



HELSINGIN YLIOPISTO
HELSINGFORS UNIVERSITET
UNIVERSITY OF HELSINKI
MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA
MATEMATISK-NATURVETENSKAPLIGA FAKULTETEN
FACULTY OF SCIENCE

Pro gradu -tutkielma

Näkökulmia modernin fysiikan opetukseen lukiossa

Laura Tolvanen
30.9.2020

Ohjaaja: professori Ismo Koponen
Tarkastajat: Ismo Koponen ja dosentti Maija Nousiainen

HELSINGIN YLIOPISTO
FYSIKAN OSASTO
MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA
PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2a)
00014 Helsingin yliopisto



HELSINGIN YLIOPISTO
HELSINGFORS UNIVERSITET
UNIVERSITY OF HELSINKI

MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA
MATEMATISK-NATURVETENSKAPLIGA FAKULTETEN
FACULTY OF SCIENCE

Tiedekunta – Fakultet – Faculty		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree programme	
Matemaattis-luonnontieteellinen		Fysiikan opettajan koulutus	
Tekijä – Författare – Author			
Laura Tolvanen			
Työn nimi – Arbetets titel – Title			
Näkökulmia modernin fysiikan opetukseen lukiossa			
Työn laji – Arbetets art – Level	Aika – Datum – Month and year	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages	
Pro gradu -tutkielma	30.9.2020	53	
Tiivistelmä – Referat – Abstract			
<p>Tässä tutkielmassa tarkastellaan modernin fysiikan opetukseen liittyviä tutkimuksia tavoitteena löytää mahdollisuuksia soveltaa niistä löytyviä ajatuksia, ideoita ja tuloksia uuden 2019 julkaistun lukion opetussuunnitelman mukaiseen modernin fysiikan opetukseen. Tutkielmassa esitellään kirjallisuussynteesin kautta modernin fysiikan opetukseen liittyvää tutkimusta, ja pohditaan tarkemmin, miten yhdistää tutkimustietoa uuden lukion opetussuunnitelman mukaiseen modernin fysiikan opetukseen.</p> <p>Luvussa 2 perehdytään perustelemaan työn tarkoitusta ja esittelemään menetöt, joita työhön on käytetty. Luvussa 3 esitellään modernin fysiikan opetusta koskevaa tutkimusta. Luvussa 4 käydään läpi yleisiä linjauksia uudessa lukion opetussuunnitelmassa ja esitellään lukion opetussuunnitelman perusteet 2019 modernin fysiikan osalta. Luvuissa 5 ja 6 tutkitaan, millaisia opetusratkaisuja Aine, säteily ja kvantittuminen -opetusmoduulissa voitaisiin tehdä opetuksen tutkimuksen valossa. Luvussa 7 arvioidaan tehtyä työtä sekä pohditaan parannusehdotuksia ja työn jatkokehittelyä.</p> <p>Tutkimuskirjallisuuden perusteella työssä todetaan, että modernin fysiikan käsitteellinen hallinta on haastavaa vielä yliopistotasollakin. Käsitteiden syvälinen hallinta on vaikeaa, vaikka opiskelijat olisivatkin opiskelleet fysiikkaa yliopistotasolle asti. Pääsääntöisesti opiskelijoiden vaikeudet liittyvät klassisen fysiikan ja kvanttifysiikan mallien sekoittumiseen, tietomallien väärinymmärtämiseen tai siihen, että tietoa omaksutaan vain pinnallisesti.</p> <p>Opetuskokeilujen ja opetuksen liittyvien tutkimusten kautta on saatu tuloksia, että erilaiset opetusmenetelmät voivat parantaa opiskelijoiden opiskeltavan sisällön hallintaa käsitteellisellä tasolla. Esimerkiksi tarinallisuus ja pienryhmäkeskustelut ovat tutkimuksissa tuoneet lupaavia tuloksia siitä, että opiskelijoiden käsitteiden hallinta saa tukea monipuolisista opetusmuodoista.</p> <p>Uusi opetussuunnitelma mahdollistaa oppiainerajat ylittävän opetuksen, eikä modernin fysiikan moduulia ole pakko opettaa itsenäisenä kokonaisuutena, vaan opinnot voidaan kytkeä myös muiden oppiaineiden opetukseen. Esimerkiksi yhteisiä opintojaksoja voidaan suunnitella filosofian, historian ja kemian opetuksen kanssa. Lisäksi modernin fysiikan opetukseen on mahdollista yhdistää kattavasti elementtejä lukio-opetuksen laaja-alaisista tavoitteista liittyen mm. vuorovaikutus- ja ympäristöosaamiseen. Jatkotutkimuksen osalta olisi myös kiinnostavaa yhdistää opinto-ohjausta ja urasuunnittelua modernin fysiikan opetukseen lukiotasolla.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
fysiikan opetus, modernin fysiikan opetus, lukiofysiikka, lukion opetussuunnitelman perusteet 2019			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
E-thesis			
Muuta tietoa – Övriga uppgifter – Additional information			

Sisällys

1 Johdanto.....	1
2 Teoreettiset lähtökohdat tutkimukselle ja tutkimusmenetelmät.....	5
2.1 Tutkimusongelman muotoilu.....	5
2.2 Lähdekirjallisuuden taustaa.....	6
2.3 Tutkimuksen vaiheet ja aineiston hankinta- ja analyysimenetelmät	7
2.4 Tutkimuksen luotettavuus ja merkitys.....	8
3 Modernin fysiikan opetuksen tutkimus	10
3.1 Oppijoiden vaikeudet modernin fysiikan käsitteiden omaksumisessa	14
3.2 Yleisen tason ratkaisuja opiskelijoiden vaikeuksiin	17
4 Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019	22
4.1 Opetuksen yleiset tavoitteet ja laaja-alainen osaaminen	23
4.1.1 Yleiset tavoitteet.....	23
4.1.2 Laaja-alainen osaaminen lukiossa	24
4.2 Fysiikka – oppiaineen tehtävä ja laaja-alainen osaaminen oppiaineen tasolla	27
4.3 Fysiikan opetuksen yleiset tavoitteet ja arviointi	28
4.4 Modernin fysiikan tavoitteet lukion opetussuunnitelmassa.....	29
4.5 Modernin fysiikan keskeiset sisällöt lukion opetussuunnitelmassa.....	30
5 Näkökulmia modernin fysiikan opetukseen lukiossa	31
5.1 Klassisen fysiikan ja kvanttifysiikan erojen korostaminen	32
5.2 Kokeellisuus ja sensomotoriset kokemukset	33
5.3 Ajatuskokeet ja filosofia.....	34
5.4 Luonnontieteiden historian näkökulma	36
5.5 Tarinankerronta ja popularisoidut tiedeartikkelit	37
5.6 Tietokonesimulaatiot	39
5.7 Keskustelut ja selittäminen vertaisille	40
5.8 Erityiset lähestymistavat: kvanttitila, kvanttoni ja Diracin muotoilu	40
5.9 Ekskursiot ja teknologia	42
6 Tulosten tarkastelua ja pohdintaa	43
7 Johtopäätökset ja suositukset.....	47
Lähteet	51

1 Johdanto

Fysiikan opetuksessa nousee ajoittain esiin tarve modernisoida koulufysiikan oppisisältöä vastaamaan paremmin yleissivistävälle opetukselle asetettuja tavoitteita. Fysiikan opetus Suomen peruskouluissa ja lukioissa painottuu klassisen fysiikan opetukseen, vaikka 1900-luvun vaihteen jälkeenkin on tehty mielenkiintoisia ja yleissivistyksen kannalta merkittäviä fysiikan löytöjä. Fysiikan käsitteellisen hierarkkisisuuden vuoksi on kuitenkin vaikeaa, jopa melkein mahdotonta, keksiä sellaista oikoreittia opetukseen, että voitaisiin suoraan siirtyä opettamaan aineen rakennetta, avaruutta ja kosmologiaa käsitteleviä fysiikan ilmiöitä.

Tämän tutkielman aiheena on tarkastella modernin fysiikan opetukseen liittyviä tutkimuksia ja tavoitteena on löytää mahdollisuuksia soveltaa tutkimuksesta löytyviä ajatuksia, ideoita ja tuloksia uuden 2019 julkaistun lukion opetussuunnitelman mukaiseen fysiikan opetukseen. Suomessa kouluopetusta säädellään valtakunnallisella opetussuunnitelmalla, ja oppilaitokset tekevät näiden suuntaviivojen mukaisesti omat paikalliset opetussuunnitelmansa, joita opettajien edellytetään noudattavan opetuksessaan. Opetuksen on oltava linjassa opetussuunnitelman kanssa, joten opetettava aines on järjestettävä ja mietittävä opetussuunnitelman ohjaamana.

Oppilaiden näkökulmaa ja oppimista tutkittaessa havaitaan verrattain usein, että oppilaiden muodostamat ajatusmallit eivät yllä tieteellisiin käsityksiin asti, sisältöjen oppiminen saattaa jäädä pinnalliseksi ja asian ymmärtäminen vaillinaiseksi. Oppilaiden ymmärrys luonnontieteistä on usein myös hyvin rajallinen, ja he ovat omaksuneet puutteellisia mielikuvia tieteen luonteesta mm. kouluopetuksen kautta. Vastatakseen näihin ongelmiin, tutkijat ovat pyrkineet löytämään tehokkaampia tapoja opettaa fysiikkaa ja muita luonnontieteitä. Kouluopetuksessa voitaisiin pyrkiä parempaan tulokseen sen suhteen, että opiskelijat oppisivat syvällisemmin edes joitakin asioita. Opetussisältöjä ei tulisi omaksua vain pintapuolisesti, mutta valitettavasti sille tasolle modernin fysiikan ilmiöiden hallinta lukion opetuksessa usein jää.

Koulufysiikan opetuksen pysähtyneisyys käsittelemään vain klassista fysiikkaa ennen 1900-luvun vaihdetta on ollut arvostelun kohteena jo pitkään. Kosmologi Syksy Räsänen on esittänyt, että koulufysiikan sisältöjä tulisi modernisoida (Räsänen 2018). Räsänen mukaan esimerkiksi sähköopin kurssi käsittelee oppisisällöllisesti hyvinkin

yksityiskohtaisia asioita (mm. diodit, kondensaattorit, LEDit), mutta kosmologian löytöjä käsitellään hämmästyttävän pintapuolisesti yleissivistävässä koulutuksessa. Miksi vaihtovirtapiirin toiminnan oppiminen katsotaan merkityksellisemmäksi yleissivistyksen kannalta kuin vaikka maailmankaikkeuden rakennetta selittävien teorioiden käsittely? Kyse on valinnoista, joita opetussisältöjen suhteen tehdään, etenkin opetussuunnitelman tasolla.

Vuonna 2011 Tiede-lehdessä pohdittiin, onko kouluopetus jäänyt jälkeen tieteen kehityksestä (Mutanen 2011). Artikkelissa tarkastellaan, miten lukion biologian ja fysiikan oppikirjojen sisällöistä voidaan havaita tieteen edistyminen. Artikkelissa haastateltu Helsingin yliopiston kosmologian professori Kari Enqvist antaa tylyn tuomion fysiikan oppikirjoista: kirjojen sisällöt ovat kuin teipillä ja laastarilla koottu kokoelma kirjavia eri-ikäisiä tiedon palasia, joita tarkastellaan yli sata vuotta vanhasta näkövinkkelistä. Enqvistin mukaan kouluopetus tulisi kääntää pääläelleen, ja aloittaa lukion fysiikan opiskelu modernin fysiikan keskeisistä saavutuksista ja painottaa nykyfysiikan käsitteellistä yhtenäisyyttä, jossa ilmiöt nähdään muutaman harvan perusperiaatteen ilmentyminä. Enqvistin mielestä lukiossa opeteltavan mekaniikan voimavektorit voisi säästää insinöörien ammattiopintoihin, eikä kiusata niillä muita. Toki voi kyseenalaistaa sen, ovatko kosmologit oikeita henkilöitä kommentoimaan fysiikan opetuksen tilaa, vai onko tarkempi kuva opetuksen kokonaisuudesta tiedossa vaikkapa kouluissa työskentelevillä fysiikan opettajilla.

Tilaisuus lukion opetussuunnitelman uuden version suunnittelulle on avautunut muutamaa otteeseen Enqvistin esittämien mielipiteiden jälkeen. Uusin lukiolaki on astunut voimaan elokuussa 2019, ja samalla lukion opetussuunnitelman perusteet uusittiin. Uusia lukion opetussuunnitelman perusteita tulee soveltaa opetukseen alkaen syksystä 2021. Yleisesti lukio-opetuksen tavoitteena on mm. työelämätaitojen korostaminen opetuksessa, laajasti sivistyneen ihmisen ideaali ja oppilaiden entistä kattavampi opinto-ohjaus (mm. jälkiohjaus vuoden ajan valmistumisen jälkeen). Erityisesti uudessa lukion opetussuunnitelmassa on määritelty laaja-alaisen osaamisen tavoitteet, jotka lävistävät kaikkien oppiaineiden sisällöt ja joiden opetukseen kaikessa lukion opetuksessa tulee kiinnittää huomiota. Nämä oppiaineiden yhteiset tavoitteet korostavat mm. hyvinvoinnin, vuorovaikutuksen, monitieteisyyden, luovuuden, eettisyyden, kulttuurin, kansainvälisyyden, ympäristön suojelun sekä yhteiskunnallisen osaamisen merkitystä opiskelijan kasvuun ja kehitykselle lukio-opetuksen piirissä.

Lukion opetussuunnitelman perusteissa esitetään myös monia muita keskeisiä uudistuksia. Lukion kurssimuotoisuus on esimerkiksi korvattu uusissa opetussuunnitelman perusteissa opintopisteillä, joista valtakunnallisesti pakollisia fysiikan opintopisteitä on lukiokoulutuksen osaksi määritelty 2 opintopistettä. Toinen niistä opiskellaan teemalla fysiikka luonnontieteenä, ja opintomoduulissa keskitytään fysiikan kokeelliseen luonteeseen ja kvantitatiiviseen mallintamiseen. Toisen opintopisteen teemana on fysiikka, ympäristö ja yhteiskunta, ja moduulissa keskitytään energian tuotantoon ja siirtoon, sekä tuotantoprosessin vaikutuksiin ympäristöön ja yhteiskuntaan. Valtakunnallisesti valinnaisia fysiikan opintoja on lisäksi määritelty 12 opintopisteen edestä. Valinnaisiin opintoihin sisältyy kahden opintopisteen laajuinen FY8 Aine, säteily ja kvanttuminen -moduuli, jossa opiskellaan myös viimeisen 120 vuoden ajanjaksolla kehitettyjä modernin fysiikan käsitteitä. Käsitteiden omaksumiseen tarvitaan aiempien fysiikan kurssien sisältöjä, joten on perusteltua, että modernia fysiikkaa opiskellaan vasta lukion loppuvaiheessa.

Fysiikan opetuksen niin sanottua modernisointia vaikeuttaa fysiikan tieteenalan vahva käsitteellinen hierarkkisuus. Usein uudempien teorioiden ymmärtämiseksi tarvitaan vanhempien teorioiden omaksumisen kautta muodostunutta käsitteellistä pohjaa. Perusasiat on sisäistettävä lähtökohtaisesti opetuksen avulla, jotta jatko-opinnoissa voidaan edetä oppimaan fysiikan sisältöjä syvällisemmin ja laajemmin. Peruskoulu- ja lukioasteella on hyödyllistä opiskella tarvittavia ajattelu-, argumentointi- ja laskutaitoja, jotta pidemmälle kehitettyjä fysiikan teorioita voidaan ymmärtää ja omaksua. Perusasioita ei siis voida opetuksessa sivuuttaa, jotta opetuksen vaikuttavuus ei kärsi. Toisaalta tutkimuksen valossa modernia fysiikkaakin on mahdollista opettaa niin, että opiskelijat todella omaksuvat keskeisiä käsitteitä modernin fysiikan piiristä.

Ennen kaikkea modernin fysiikan opintojen sisällyttäminen lukion opetussisältöihin voi parantaa oppilaiden mielenkiintoa aihepiiriä kohtaan, ja tuottaa opiskelijoille oppimisen ja oivaltamisen iloa. Kari Enqvist kuvailee kolumnissaan, kuinka modernin fysiikan ilmiöt ovat suuren yleisön - eli meidän kaikkien - kiinnostuksen kohteena, kun tarkastellaan esimerkiksi ihmisten tekemiä Google-hakuja mustiin aukkoihin liittyen (Enqvist, 2018). Enqvistin ajatusta suoraan lainatakseni: *Älyllisen uteliaisuuden kipinä hehkuu meissä jokaisessa*. Yleissivistävän opetuksen tulisi antaa mahdollisimman paljon tukea opiskelijoille tuon uteliaisuuden säilyttämiseksi.

Tutkielman tavoitteena on esitellä ja kirjallisuussynteesin muodossa tuoda näkyville modernin fysiikan opetukseen liittyvää tutkimusta, ja pohtia tarkemmin, miten yhdistää tutkimustietoa uuden lukion opetussuunnitelman mukaiseen modernin fysiikan opetukseen. Lähtökohtana on tuoda esiin tutkimustuloksia, jotka keskittyvät modernin fysiikan opetukseen, kuvailla uuden lukion opetussuunnitelman sisältöä ja tavoitteita sekä yhdistää nämä tavoitteet koontiin tutkimusten tuloksista.

Luvussa 2 perehdytään johdantoa syvemmin perustelemaan työn tarkoitusta, pohtimaan tutkielmassa käytetyn tiedon luotettavuutta ja esittelemään menetelmät, joita työhön on käytetty. Luvussa 3 käsitellään yleisellä tasolla modernin fysiikan opetusta koskevaa tutkimusta, jota on tämän tutkielman teon yhteydessä käyty läpi. Samassa yhteydessä pohditaan käsitteiden oppimiseen liittyviä ongelmia, joita tutkimus on tuonut esiin. Luvussa 4 esitellään ja tiivistetään yleisiä linjauksia ja opetuksen tavoitteita uudessa lukion opetussuunnitelmassa sekä tuodaan esiin lukion opetussuunnitelman perusteet 2019 modernin fysiikan osalta. Luvussa 5 kootaan yhteen erilaisia tutkimusaineistosta nousevia ideoita ja lähestymistapoja modernin fysiikan opetukseen ja yhdistetään näitä ajatuksia opetussuunnitelman perusteiden kautta todettuihin lukio-opetuksen tavoitteisiin. Luvussa 6 pohditaan, miten kirjallisuudesta löydettyjä opetusratkaisuja voitaisiin soveltaa modernin fysiikan opetukseen linjassa lukion opetussuunnitelman perusteiden kanssa. Luvussa 7 arvioidaan tehtyä työtä, pohditaan työstä tehtyjä johtopäätöksiä ja suunnitellaan tutkimuksen jatkokehittelyä aihepiirin sisällä.

2 Teoreettiset lähtökohdat tutkimukselle ja tutkimusmenetelmät

Tämän tutkimuksen tärkeimpänä menetelmänä on käytetty kirjallisuussynteesiä, jonka avulla on kerätty tietoa tutkittavasta aihealueesta. Tutkimus edustaa kvalitatiivista eli laadullista tutkimussuuntausta, ja tavoitteena on aluksi luoda kokoava yhteenveto useasta lähteestä kirjoitelman taustaksi. Tutkimuksen aineisto on kerätty ensisijaisesti käyttämällä elektronista artikkelihakua. Muutamia lähteitä on löydetty myös Internet- ja lehtikirjoituksista. Keskeisenä lähteenä työlle on käytetty vuonna 2019 julkaistua viranomaismääräystä ”Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019” (Opetushallitus 2019).

2.1 Tutkimusongelman muotoilu

Tutkimusongelman muotoilua on motivoinut tarve löytää ajatussuuntia ja mahdollisia konkreettisia toimenpide-ehdotuksia lukio-opetuksen laadun kehittämistyön tueksi. Tutkielman lukijalle tarjotaan yhteenveto modernin fysiikan opetuksesta painottuen tutkimustietoon sekä uuden lukion opetussuunnitelman mukaisiin opetuksen tavoitteisiin ja linjauksiin.

Tutkimusongelmien kokonaisuus on muotoiltu seuraavasti:

1. Miten fysiikan opetuksen tutkimuksen valossa lukion opetussuunnitelman mukaisessa Aine, säteily ja kvantittuminen -opintomoduulissa voidaan huomioida modernin fysiikan käsitteiden oppimiseen liittyvät haasteet?
2. Millaisia opetustapoja ja -metodeja voidaan suositella modernin fysiikan käsitteiden opettamiseen tämän tutkimuskokonnin valossa?

Tutkimusongelman muotoilu on tietoisesti tehty hieman laajaksi, jotta tutkimuksen tuloksena voidaan tuoda ilmi tutkimusaineistosta nousevat erilaiset käsitykset ja ratkaisut kirjoitelman tarkoitusta palvelevalla tavalla. Tutkimuksen laajuus ei ole kaiken kattava siihen nähden, että fysiikan opetuksesta ja myös modernin fysiikan opetuksesta on julkaistu todella paljon tutkimuskirjallisuutta, jota ei ole mahdollista koko laajuudessaan käyttää tämän tutkielman pohja-aineistona. Tutkimusaineistoon

valitussa taustakirjallisuudessa on käsitelty erityisesti kvanttifysiikan opettamiseen ja oppimiseen liittyviä ilmiöitä. Muiden modernin fysiikan teemojen opetukseen liittyvä tutkimuskirjallisuus on näin ollen jäänyt vähemmälle huomiolle tutkimusaineiston koonnissa.

2.2 Lähdekirjallisuuden taustaa

Tutkielmassa on ensisijaisesti käytetty lähteenä modernin fysiikan opetukseen keskittyneitä tutkimuksia. Modernin fysiikan opetusta on käsitelty lähteenä käytetyissä tutkimuksissa eri koulutustasoilla ja useissa eri maissa toteutetussa opetuksessa. Eri maiden opetuksessa käytössä olevat opetussuunnitelmat kouluissa ja yliopistoissa voivat olla oleellisesti erilaisia, ja tutkimuksia on siten toteutettu ja raportoitu hyvin erilaisiin teemoihin keskittyen.

Tutkielmaa varten läpikäytyjä tutkimuksia on tehty sekä yliopisto-, lukio- että yläkoulutasolla. Tutkimukset ovat kansainvälisiä, joten vastaavat koulutustasot ovat englanniksi julkaistussa tutkimusaineistossa undergraduate, college ja high school. Lähteenä käytetyissä tutkimuksissa on sovellettu ja tutkittu erilaisten opetusmetodien vaikutusta oppilaiden oppimiseen. Tutkimusten toteutuksessa on käytetty sekä kvantitatiivisia että kvalitatiivisia metodeja opetuksen vaikuttavuuden tarkastelussa. Tässä tutkielmassa on myös esitelty uutta lukion opetussuunnitelmaa sen yleisen osan osalta, sekä oppiainekohtaista osuutta fysiikan ja modernin fysiikan osalta.

Menetelmänä tutkimusaineiston hankintaan on käytetty elektronista artikkelihakua fysiikan ja luonnontieteiden opetuksen tutkimukseen painottuneista tieteellisistä lehdistä. Artikkeleita ei ole etukäteen arvioitu tai rajattu koskemaan vain tiettyä aikaa, aihepiiriä tai artikkelin saamien viittausten määrää. Ainoana kriteerinä on ollut, että artikkeli on julkaistu tieteellisessä julkaisussa. Muutamia pelkästään elektronisesti julkaistuja artikkeleita on myös käytetty työn lähteenä, eikä artikkelin relevanssia juuri tutkimuskysymyksen kannalta ei ole erityisesti painotettu. Modernin fysiikan opetuksen tutkimuksista suurin osa on tässä käytetyssä aineistossa painottunut yliopistotasolle, koska modernia fysiikkaa opetetaan enemmän yliopistotasolla. Toisaalta lukion opetussuunnitelman perusteissa 2019 esitetään lukiolakiin pohjautuen, että lukio-opiskelijoiden siirtymistä korkeakouluopintojen pariin tulisi sujuvoittaa

(Opetushallitus 2019, 24), joten opintoja on perusteltua suunnitella ja rakentaa lukiossa osittain korkeakoulutasoisesti.

2.3 Tutkimuksen vaiheet ja aineiston hankinta- ja analyysimenetelmät

Kirjallisuussynteesiä tehtäessä on aluksi keskitytty aineiston hankintaan ja lukemiseen sekä muistiinpanojen tekoon. Samanaikaisesti on luotu yhteyksiä ja ryhmitelty tietoa eri lähteiden välillä, ja kerätty aineistosta nousevia ideoita tutkimusongelmiin vastaamiseksi ja ratkaisujen löytämiseksi. Tiedon kokoamisen ohessa on tehty lisähakuja, sekä rajattu joitakin tutkimuksia pois aineistosta, koska ne eivät ole tarpeeksi suoraan koskettaneet tutkimusongelman piirissä olevia asioita. Aineistosta on koostettu yhteenvetoja ja vertailuja sekä jäsennetty tutkielman rakennetta löytyneiden ajatusten pohjalta.

Materiaalia on arvioitu sen hyödyllisyyden ja sopivuuden kannalta ja koostettu yhtenäisistä muistiinpanoista ja tekstijaksoista ideoita ja näkökulmia opetuksen suunnittelua koskevaa tutkielman osaa varten. Välipalautteen myötä kehitettiin tutkielman rakennetta vastaamaan paremmin tutkimuskysymysten muodostaman viitekehyksen tarpeisiin. Tutkielmaan sisällytettiin ratkaisuehdotusten lisäksi jakso, jossa esitellään fysiikan opetuksen tutkimusta yleisellä tasolla sekä niitä oppimisen ongelmia, joita fysiikan opetuksen tutkimuksessa on havaittu modernin fysiikan oppimisen osalta.

Aineiston hankinnassa ja analyysissa on käytetty hyväksi artikkeleiden lähdeluetteloista löytyviä kirjallisuusviitteitä, jotka ovat johdattaneet löytämään lisää aiheen kannalta merkityksellistä ja kiinnostavaa tutkimuskirjallisuutta. Moniin artikkeleihin on ensin tutustuttu silmäillen. Artikkeleissa esiintyneistä ajatuksista on myöhemmässä vaiheessa työstetty lyhennelmiä, referaatteja ja muistiinpanoja, joita on jatkossa yhdistetty teemojen mukaan ja luotu runko kirjalliselle tutkielmalle.

2.4 Tutkimuksen luotettavuus ja merkitys

Tutkimusaineistoa modernin fysiikan opetuksesta on olemassa paljon. Tutkielmassa aineistona on käytetty n. 50 artikkelia fysiikan opetuksen tutkimukseen liittyen. Aineiston määränä se on kohtuullisen pieni, koska aineistoa aiheesta on julkaistu paljon ja julkaistaan jatkuvasti lisää. Aineisto on siis kohtuullisen suppea, mutta aineistoa ei ole haluttu etukäteen rajata voimakkaasti teemojen suhteen, koska lukion opetussuunnitelman perusteista voidaan tunnistaa muutamia eri opetussisältöjä, jotka poikkeavat aiemmasta vastaavasta opetussisällöstä moderniin fysiikkaan liittyen.

Fysiikan opetukseen keskittyneissä tutkimuksissa on käynyt ilmi, että tutkimus saattaa painottua aineistoihin, joissa tutkimuksen kohteena olevat opiskelijat ovat erityisesti matemaattisesti suuntautuneita (muun muassa fysiikkaa opiskelevat yliopisto-opiskelijat). Nämä opiskelijaryhmät eivät näin ollen ole edustavia otoksia koko siitä opiskelijapopulaatiosta, joka fysiikkaa jossakin vaiheessa elämäänsä opiskelee. Esimerkiksi Kanim ja Cid (2017) kävivät läpi suuren määrän kolmessa eri tieteellisessä julkaisussa julkaistuja artikkeleita. He vertasivat tutkimuksissa tutkittujen oppilaiden edustavuutta kaikkiin fysiikkaa opiskeleviin oppilaisiin ja opiskelijoihin nähden, ja totesivat, että näissä tutkimuksissa tutkitut oppilaat ja opiskelijat olivat opiskelleet matematiikkaa enemmän. Tutkitut opiskelijat eivät siis edustaneet niin monimuotoista joukkoa opiskelijoita kuin kaikkien fysiikan opetuksen piiriin kuuluu. (Kanim ja Cid, 2017.)

Frazer (2017) on myös tehnyt tutkimusta julkaistun aineiston kattavuudesta yhden tieteellisen julkaisun sisältöanalyysin kautta. Hän havaitsi, että erityisesti sukupuolta on käytetty usein erottelevana tekijänä tutkimuksissa, mutta samalla monet eivät niin näkyvät opiskelijaryhmät ovat jääneet tutkimatta.

Yleisesti ottaen fysiikan opetuksen tutkimus ei mahdollisesti anna kuvaa niin sanottujen tavallisten opiskelijoiden tilanteesta, vaan tutkittu oppilasaines on jonkin verran ainakin matemaattisesti kyvykkäämpää kuin tavallinen oppilasaines. Kanim ja Cid (2017) ehdottavatkin, että fysiikan opetuksen tutkimuksen saralla olisi hyödyllistä tutkia eri taustoista tulevien opiskelijoiden ajatusmalleja. Tutkimusta voitaisiin kohdentaa koskemaan opiskelijoiden ja oppilaiden taustoista riippuvia variaatioita ajatusmalleissa. Näin voitaisiin luoda opetusmateriaaleja ja muuttaa opetuskäytänteitä

sellaisiksi, että ne parhaiten tukisivat kaikkia fysiikkaa lukevia opiskelijoita. Frazerin (2017) ehdotuksen mukaan myös oppilaita, joilla on esimerkiksi oppimisvaikeuksia tai vammoja (eng. disabilities), voitaisiin tutkia enemmän. Hän havaitsi myös, että käsitteiden oppimisen tutkimus on ollut yleistä hänen tutkimassaan aineistossa.

Frazer ehdottaa, että resurssien ollessa rajalliset, on syytä hyödyntää tapaustutkimusta ja pienryhmiä, kun selkeästi olisi tilausta erilaisten opiskelijoiden oppimisen tutkimuksen lisäämiseksi. (Frazer 2017.) Tässä tutkimuksessa ei keskitytä arvioimaan fysiikan opetuksen tutkimuksen relevanssia, vaan lähinnä keskitytään esittelemään löydettyjä tuloksia, jotka voivat edesauttaa ymmärtämään, kuinka oppilaat hahmottavat modernia fysiikkaa ja sen käsitteistöä.

Juuti ja Lavonen (2016) puolestaan tutkivat, kuinka opetuksen järjestäminen vaikuttaa oppilaiden päätökseen osallistua fysiikan kursseille lukiossa. Tutkimuksessa käytettiin aineistona suomalaisten peruskoulun viimeisen luokan oppilaita. Analyysissa todetaan, että mikäli peruskoulussa halutaan tukea oppilaita valitsemaan myöhemmin fysiikkaa, kannattaa opettajan käyttää monipuolisia opetusratkaisuja ja vahvistaa oppilaiden käsitystä fysiikan merkityksellisyydestä. (Juuti ja Lavonen 2016.)

Monipuolisten opetusratkaisujen löytäminen arjessa voi olla opettajalle haastavaa, mutta fysiikan opetusta koskeva tutkimuskirjallisuus tarjoaa mahdollisuuden perehtyä aihetta tutkineiden tutkijoiden ajatuksiin ja ideoihin. Osaltaan tämänkin luonteeltaan kokoavan ja yhteenvedonomaisten tutkimuksen on tarkoitus auttaa opettajaa tässä työssä. Merkityksellisyyden kokemus on moniulotteinen ilmiö, johon vaikuttaa laajasti monet yksilöä ja yhteisöä koskevat seikat. Merkityksellisyyden kokemuksen voi mahdollistaa oppilaille hyvin perusteltu ja innostava opetus, jonka koostamisessa on käytetty apuna tutkimusperusteista tietoa.

3 Modernin fysiikan opetuksen tutkimus

Modernin fysiikan opetusta on tutkittu paljon. Modernilla fysiikalla tarkoitetaan yleisesti ottaen 1900-luvun vaihteen jälkeistä fysiikkaa, ja modernin fysiikan aikakauden alun pääasiallisina käännekohtina pidetään Einstein muotoilemaa suhteellisuusteoriaa ja kvanttifysiikan aikakauden alkamista. Modernin fysiikan alkutaival liittyy siis siihen ajanjaksoon, kun tiedeyhteisö on laajentanut kollektiivista käsitystään pois klassisen fysiikan oletuksista kohti yksityiskohtaisempaa ymmärrystä aineen rakenteesta ja maailmankaikkeuden synnystä. Oppilaan tai opiskelijan on kyettävä tekemään samankaltainen ajattelutavan muutos siirtyessään hahmottamaan kvanttifysiikan selitysmalleja, eikä tuo muutos ole välttämättä helposti toteutettavissa, kuten useissa tutkimuksissa on raportoitu.

Ayene, Kriek ja Damtie (2011) ovat tutkimuksessaan yliopisto-opiskelijoiden parissa havainneet, että jopa muodollisen kvanttimekaniikan opetuksen jälkeen opiskelijat käyttivät sekaisin klassisen fysiikan ja kvanttifysiikan kuvauksia ja määritelmiä toimiessaan kvanttimekaanisessa viitekehyksessä. Tutkijat päättelivät tämän tuloksen perusteella, että perinteiset tavat opettaa kvanttimekaniikkaa puoltavat epäjohdonmukaista oppimista, eikä perinteisen opetuksen keinoin pystytä opettamaan asian todellista ymmärtämistä. (Ayene ym. 2011.)

Monissa tutkimuksissa eri koulutuksen asteilla on todettu tämä sama ongelma: opiskelijat ovat sisäistäneet klassisen fysiikan oletukset niin vahvasti, että kvanttifysiikan erilaisten oletusten omaksumisesta tulee vaikeaa. Tämän seurauksena nämä kaksi maailmaa sekoittuvat opiskelijoiden käsityksissä. Lisäksi oppiminen saattaa jäädä liian pintapuoliseksi, kun uusien käsitysten omaksuminen tuottaa hankaluuksia. Johnston, Crawford ja Fletcher (1998) päättelivät tutkimuksessaan, että on vain hiukan todisteita, että heidän kyselynsä tuloksena saadut tulokset opiskelijoiden osaamistasosta viittaisivat syvälliseen ymmärtämiseen, vaan että opiskelijoilla on opetuksen jälkeen vain kokoelma erillisiä faktoja mielessään. Ei ole todisteita siitä, että nämä faktat muodostaisivat yhtenäisen rakenteen. (Johnston ym. 1998.)

Wuttiprom, Sharma, Johnston, Chitaree ja Soankwan (2009) ovat tunnistaneeet tutkimuksen pohjalta useita syitä kehittää käsitteellistä tutkimusta kvanttifysiikasta.

Kvanttifysiikasta on ensinnäkin kasvanut tärkeä osa jokapäiväistä elämää mm. teknologisten sovellusten kautta. Kvanttifysiikka on myös osoittautunut hankalaksi ymmärtää abstraktin teorian ja monimutkaisen matemaattisen mallintamisen vuoksi. Lisäksi kvanttifysiikan oppimista on kenties tutkittu vähemmän kuin muiden fysiikan alueiden oppimista. (Wuttiprom ym. 2009.)

Teknologinen kehitys on jatkuvaa, eikä kouluopetuksen sisällä ehditä käymään läpi kaikenlaisia teknologisia sovelluksia, joiden kehityksessä kvanttifysiikka on auttanut. Kuitenkin yleissivistävällä tasolla on hyödyllistä ymmärtää edes hieman siitä, miten nykyinen moderni teknologia on kehittynyt ja saavuttanut nykyisen tasonsa ja miten se tulevaisuudessa voi vielä kehittyä tästä eteenpäin. Vaikka kvanttifysiikkaa pidetään hankalana aiheena teorian ja matemaattisen formalismin perusteella, voidaan kuitenkin olettaa, että oppilaiden vaikeudet tunnistamalla voidaan kehittää ratkaisuja, joiden avulla oppimisesta ja opetuksesta voidaan luoda mielekkäämpi kokonaisuus. Toisaalta Henriksen, Angell, Vistnes ja Bungum (2018) ovat havainneet, miten tieteen opetuksen tutkimuksessa ei tarjota kovin usein vahvaa todistusaineistoa sille, millaista lähestymistapaa opetuksessa tulisi käyttää. Usein tutkimusten tulosten perusteella vain tyydytään ehdottamaan jonkinlaista uutta tai uudelleenmuotoiltua toimintatapaa tai toimintamallia, mutta jätetään testaamatta, kuinka ehdotus uudesta lähestymistavasta toimii käytännössä. (Henriksen ym. 2018.)

Fysiikan opetuksen tutkimuksen saralla on eroteltavissa monenlaisia lähestymistapoja tuottaa tutkittua tietoa fysiikan opetuksesta. Toiset tutkijat luovat testipaketin opetuksesta, ja keräävät tulokset testattuaan opetusta oppilasryhmillä ja tekevät tuloksista johtopäätöksiä opetuksen vaikutuksesta tai oppilaiden käsityksistä. Toiset taas tuottavat kirjallisuuden avulla ehdotuksia, kuinka asioita voitaisiin teoreettisesti käydä läpi opetuksessa, mutta eivät käytännössä tutki, kuinka uudenlainen opetusmalli tai -teoria oikeasti toimii käytännössä. Molempia lähestymistapoja tarvitaan. Mittavan tutkimuksen järjestäminen saattaa vaatia liikaa resursseja, mutta esittelemällä uuden idean artikkelin muodossa voi tarjota tutkimuksia lukevalle opetushenkilöstölle lisää ajatuksia ja työkaluja päivittäiseen työhönsä sekä antaa toisille tutkijoille mahdollisuuden käyttää ideaa uusien tutkimuksien pohjana.

Krijtenburg-Lewerissa, Pol, Brinkman ja van Joolingen (2017) todensivat kokoavalla tutkimuksellaan, että kvanttimekaniikan opetukseen liittyen tarvitaan tutkimusta väärinymmärryksistä, opetusstrategioista ja testaamisesta. Krijtenburg-Lewerissa ym. (2017) kävivät analyysissään läpi 74 tutkimusartikkelia, ja huomasivat, että opiskelijoilla on vaikeuksia yhdistää kvanttifysiikkaa fysikaaliseen todellisuuteen. Tiettyt tutkimusaiheet ovat jääneet vähälle huomiolle lukiotason ja alemman korkeakoulutason opetuksen tutkimuksessa. Näitä aiheita ovat heidän analyysinsä mukaan kompleksiset kvantti-ilmiöt, kuten aikariippuvuus, superpositio ja mittaamisen ongelma. Erityisesti tutkimisen arvoisia olisivat lukio-opiskelijoiden vaikeudet aaltofunktion ja potentiaalikuopan käsitteiden ymmärtämisen suhteen. Krijtenburg-Lewerissa ym. (2017) toteavat myös, että artikkeleiden analyysi paljastaa hyvin monenlaisia kvanttimekaniikan opetusstrategioita, mutta hyvin vähän on julkaistu tutkimusta siitä, millaiset strategiat todella tukevat ymmärtävää oppimista.

Hadenfeldt, Neumann, Bernholt, Liu ja Parchmann (2016) puolestaan olivat kiinnostuneita tutkimaan opiskelijoiden ymmärtämisen asteen kehittymistä koskien aineen käsitettä. Heidän mukaansa monissa tutkimuksissa on todettu jo aiemmin sellaiset aineen käsitteeseen liittyvät isot ideat, jotka opiskelijoiden olisi hyvä ymmärtää. Monia opiskelijoiden omaksumia arkipäivän kokemuksiin kytkeytyviä käsityksiä on myös tutkittu, sekä sellaisia ymmärryksen tasoja, joiden kautta opiskelijat kehittävät mielikuviaan näistä isoista ideoista ja aineen käsitteestä kokonaisuutena. (Hadenfeldt ym. 2016.)

Hadenfeldt ym. (2016) pyrkivät tutkimuksellaan löytämään selkeän kuvan opiskelijoiden aineen käsitettä koskevan ymmärryksen muodostumisesta. He tutkivat opiskelijoiden käsitysten kehitystä koskien neljää aineen rakenteeseen liittyvää isoa ideaa (rakenne ja koostumus, fysikaaliset ominaisuudet ja muutokset, kemiallinen reaktio ja säilyminen). Tutkimuksen mukaan kolme näistä isoista ideoista kehittyvät rinnakkain. Tutkimuksen mukaan opiskelijoiden ymmärrys kehittyy usein samojen vaiheiden kautta ja samassa järjestyksessä, mutta eri tahtiin. (Hadenfeldt ym. 2016.)

Fysiikan opetuksen tutkimuksen piirissä keskeinen teema on selvittää, millaisia käsityksiä oppilailla ja opiskelijoilla on ilmiöistä ennen opetusta, jotta opetuksessa voidaan ottaa huomioon nämä ennakkokäsitykset. Thacker (2003) kokoaa yhteen

havaintoja fysiikan opetuksen tutkimuksen saralta seuraavasti koskien empiirisiä tutkimuksia kognitiivisista rakenteista käsitteiden suhteen:

- 1) Oppilailla on käsityksiä fysikaalisista ilmiöistä ennen kuin he osallistuvat fysiikan opetukseen.
- 2) Nämä käsitykset eivät välttämättä sovi yhteen tieteellisten mallien kanssa.
- 3) Jotta oppilaat voivat muuttaa käsityksiään yhteneväiseksi tieteellisen kokeellisen käsityksen kanssa, täytyy
 - a) ymmärtää heidän ennakkokäsityksensä, ja
 - b) kehittää opetusta tarjoamaan heille kokeellisuuteen (tai ajatuskokeeseen) perustuvat todisteet, jotka haastavat heidän käsityksensä, jotta heidän on pakko muuttaa niitä. (Thacker 2003.)

Hanssonin, Ledenin ja Pendrillin (2019) mukaan suurinta osaa koulussa opetettavasta fysiikan sisällöstä voidaan kutsua hyvin testatuksi tieteeksi, jonka totuudenmukaisuudesta on olemassa konsensus. Tämä on sellaista tietoa, joka on suurimmaksi osaksi kehitetty yli sata vuotta sitten. Uudempaa tiedettä pakollisessa koulun tiedeopetuksessa voisi puolustaa useiden syiden vuoksi: uudemmat sisällöt kasvattavat opiskelijoiden kiinnostusta ja motivaatiota, tarjoavat näkökulmia moderniin tutkimustyöhön tieteen parissa ja toimivat viitekehyksenä Nature of Science eli NOS-aspekteille. (Hansson, Leden & Pendrill 2019.)

Koulussa esitettävä tieto on siis luonteeltaan hyvin testattua ja niin sanotusti varmaa ja todennettua. Ideaalitapauksessa epävarmuudet tiedoissa käydään läpi, jotta opiskelijoille tulee selväksi tiedon luonne kehittyvänä ja muuntuvana entiteettinä. Mahdollisesti opiskelijoiden on luontevaa hyväksyä omien käsitystensä kehittyminen ja muuttuminen, kun he voivat huomata opetuksen kautta, että itseasiassa tieteellinen tietokin on kehittynyt murrosten kautta. Tämän myötä heidän voi olla helpompi oivaltaa, että heidän omat käsityksensä tieteellisestä tiedosta elävät muutoksessa, kun opitaan ja omaksutaan uusia asioita ja sisältöjä.

Falk (2007) toteaa, että fysiikan opetuksen tutkimuksella on ollut Thackerin (2003) mukaan vaikutus myös kurssisisältöihin, opetussuunnitelmatyöhön ja kurssikirjoihin, varsinaisen fysiikan opettamisen lisäksi.

Erityisen paljon fysiikan opetuksen ja modernin fysiikan opetuksen tutkimuksessa on keskitytty tutkimaan oppilaiden ja opiskelijoiden käsityksiä, mentaalisia malleja sekä

ennakkokäsityksiä, sekä opiskelijoiden haasteita ja hankaluuksia fysiikan käsitteiden oppimisessa. Näkökulma on usein perusteltu, jotta voitaisiin saada hyödyllistä tietoa opetuksen kehittämisen pohjaksi. Seuraavassa kappaleessa esitellään erilaisia tutkimuksia, joissa on keskitytty tarkastelemaan oppilaiden ja opiskelijoiden vaikeuksia modernin fysiikan piiriin laskettavissa olevien käsitteiden omaksumiseen liittyen. Koska kvanttifysiikka liittyy aineen rakenteeseen, on osa tutkimuskirjallisuudesta yhdistetty tähän esitykseen myös kemian oppisisältöjen puolelta.

3.1 Oppijoiden vaikeudet modernin fysiikan käsitteiden omaksumisessa

Opiskelijoiden ja oppilaiden vaikeuksia omaksua tieteellisiä käsitteitä on raportoitu useissa tutkimuksissa. Cheong ja Song (2014) ovat havainneet, että opiskelijoilla on ongelmia selittää dualismiin liittyviä ilmiöitä, esimerkiksi selostaa, mitä kaksoisrakokokeessa tapahtuu. Opiskelijat eivät esimerkiksi pystyneet selittämään interferenssiä suhteessa elektroneihin ja protoneihin. Monet käyttivät selitysmallina törmäyksenkaltaista tapahtumaa sen sijaan että olisivat huomanneet mainita tässä yhteydessä aaltojen superpositioperiaatteen. (Cheong & Song 2014.)

Ayene, Krick, Damitie, Ingerman ja Thacker (2019) tutkivat fysiikan yliopisto-opiskelijoiden käsityksiä energian kvantittumisesta mustan kappaleen säteilyn selittäjänä, fotonin käsitteestä valosähköisen ilmiön ja Comptonin efektin selityksessä ja valon kvantista selitettäessä interferenssikuvion muodostumista matalan intensiteetin valon tapauksessa. He luokittelivat opiskelijoiden käsityksiä, ja monessa tapauksessa oli havaittavissa opiskelijoiden selitystavan nojaamisen klassiseen fysiikkaan viittaaviin ajatusmalleihin. (Ayene ym. 2019.)

Modernin fysiikan omaksumisessa yleiseksi ongelmaksi oppilaille muodostuvat siis klassisen fysiikan oletukset, joiden avulla fysiikkaa on opittu ymmärtämään. Siirtyminen toisenlaisiin käsittemalleihin ei käy sujuvasti, vaan opiskelijat yrittävät soveltaa aiempia ajatusmallejaan myös uudessa kontekstissa. Tämä toistuu monissa tutkimuksissa, vaikka opiskelijoiden selitysmalleja onkin tutkittu vaihtelevien ilmiöiden piirissä.

Esimerkiksi Olsen (2002) tutki lukiolaisten ymmärrystä aaltohiukkasdualismista lyhyen kvanttifysiikan johdannon jälkeen. Tutkimuksen perusteella hän toteaa, että

aaltohiukkasdualismia ymmärretään huonosti. Osa opiskelijoista osoitti selvästi muotoiltuja väärinkäsityksiä, jotka liittyivät tapaan tulkita fysiikkaa klassisen fysiikan näkökulmasta. Useat asiantuntijat ovat Olsenin (2002) mukaan todenneet, että aaltojen ja hiukkasten muodostamaan dualiteetin käsite on tarpeeton kvanttifysiikan opetuksessa, mutta silti siihen keskitytään koulu- ja yliopistofysiikassa.

Olsen (2002) tunnistaa tutkimuksensa valossa myös ongelman, että laskiessaan esimerkiksi elektronien aallonpituuksia opiskelijat eivät oikeastaan ole perillä siitä, mitä ovat laskemassa. Kvanttifysiikkaan tutustumisen ei tulisi olla siis vain mekaanista laskemista, jonka kautta opitaan toki laatimaan laskelmia esimerkiksi röntgenputkia, valosähköistä ilmiötä ja de Broglien aallonpituutta koskien, tai vaikka ratkaisemaan Schrödingerin yhtälö H-atomille perustilassa. Opetuksen tulisi pikemmin tähdätä siihen, että opiskelijat edes jollakin käsitteellisellä tasolla ymmärtävät, miten kvanttifysiikka periaatteellisella tasolla eroaa klassisesta fysiikasta. (Olsen 2002.)

Eräänlainen ongelma muodostuu siis opetuksen käytännöissä siitä, että vaikka opiskelijat sekoittavatkin klassisen fysiikan ja kvanttifysiikan käsitemaailmat, voidaan tutkimusten antaman tiedon valossa myös päätyä tulkintaan, että fysiikan mallit ymmärretään ylipäättään väärin ja puutteellisesti. Pinnallisen laskemisen ja kaavojen käytön kautta opitaan kyllä eräänlaista fysiikkaan liittyvää teknistä ja laskennallista osaamista, mutta oppimisen laadukkuus on tässä tapauksessa huonoa suhteessa siihen, että asiat voitaisiin oppia myös syvällisesti ymmärtäen ilman vääriä käsityksiä asioiden luonteesta ja merkityssisällöistä.

Myös kemian opetuksen puolella on tutkittu kvantti-ilmiöiden oppimista. Stefani ja Tsaparlis (2009) tutkivat 19-vuotiaiden kemian opiskelijoiden tietorakenteita liittyen perustason kvanttikemian käsitteiden osaamiseen. Näitä käsitteitä edustivat tutkimuksessa atomi- ja molekyyliorbitaalit, Schrödingerin yhtälö, hybridisaatio ja kemiallinen sidos. Tutkijoiden teoreettisena taustana toimi Ausubelin teoria merkityksellisestä oppimisesta, ja he tunnistivat opiskelijoiden selityksistä useita eri tason selityksiä ilmiöille. Ongelmaksi kvanttikemian käsitteiden oppimiselle he hahmottivat deterministiset atomimallit sekä mallien väärintulkittamisen ja puutteellisen ymmärtämisen. (Stefani & Tsaparlis 2009.)

Tutkimuksissa on myös havaittu opiskelijoiden käsitysten olevan toisinaan epävakaita ja niiden kehittyvän vaihteittain kohti oikeaa mallia. Margel, Eylon ja Scherz (2008)

tutkivat lukioikäisten opiskelijoiden ymmärrystä materiaaalimallista, kun mallia opiskeltiin uudenlaisen lähestymistavan avulla. He olivat kiinnostuneita oppilaiden oppimisesta erityisesti kahdessa ulottuvuudessa:

- (1) käsitteellisen mallin kehittyminen
- (2) käsitteen soveltaminen ja tieteellisen kielen käyttö.

He havaitsivat mallin kehittymisen asteittain, mutta myös tietynlaisen epävakauden käsitteiden omaksumisessa. (Margel, Eylon & Scherz 2008.)

Ireson (2000) toteaa myös tutkimuksessaan, että kaikkien opiskelijoiden ei voida olettaa omaksuvan sellaista tulkintaa kvanttiteoriasta, joka vastaisi täsmällistä ei-klassista tulkintaa teoriasta. Opettajien tulee olla herkkiä sen suhteen, että opiskelijoiden kvantti-ilmiöitä koskeva ajattelu ja kvanttifysiikkaan liittyvien käsitteiden luokittelu ei aina ole tarkoituksenmukaista, vaan siinä esiintyy vaihtelua.

Tsaparlis ja Papaphotis (2002) puolestaan tekivät tutkimuksen kreikkalaisten lukioikäisten tiedoista ja ymmärryksestä liittyen atomiorbitaaleihin, molekyylien orbitaaleihin ja niihin liittyviin käsitteisiin. He havaitsivat, että opiskelijat eivät olleet ymmärtäneet syvällisesti käsitteiden merkitystä. Opiskelijoilla ei ollut selkeää käsitystä orbitaaleista, ja heille oli ongelmallista ymmärtää orbitaalien asema todennäköisyyksiä kuvaavina ilmiöinä enemmän kuin pysyvinä entiteetteinä. Monille opiskelijoille orbitaalit edustivat määriteltyä, pysyvää tilaa, eli heille ei ollut selvää monielektronisten atomien atomiorbitaalien likimääräisyys. (Tsaparlis ja Papaphotis, 2002).

Pääsääntöisesti opiskelijoiden vaikeudet modernin fysiikan oppimisessa liittyvät siis

- 1) klassisen fysiikan ja kvanttifysiikan mallien sekoittumiseen
- 2) tietomallien ymmärtämiseen väärin tai puutteellisesti
- 3) tiedon omaksumiseen vain pinnallisesti ja osaamatta yhdistää asioita toisiinsa syvällisen ymmärryksen saavuttamiseksi.

Seuraavaksi esitellään tutkijoiden ehdotuksia ratkaisuiksi ongelmiin yleisellä tasolla.

3.2 Yleisen tason ratkaisuja opiskelijoiden vaikeuksiin

Monissa tutkimuksissa esitetään ratkaisuiksi tutkittuja ja testattuja opetusmenetelmiä opiskelijoiden vaikeuksien ratkaisemiseen opetuksen avulla. Monesti tutkimuksissa myös kehoitetaan soveltamaan toimenpide-ehdotuksia, joihin on päädytty opiskelijoiden virhekkäsitysten löytymisen kautta.

Ireson (2000) ehdottaa, että kvanttifysiikan opetuksessa voitaisiin noudattaa Fischlerin ja Lichtfeldin ehdottamaa lähestymistapaa (Fischler & Lichtfeld 1992). Heidän lähestymistapansa on seuraavanlainen:

- 1) Vältetään viittaamista klassiseen fysiikkaan.
- 2) Valosähköisen ilmiön opetus aloitetaan elektroneista ei fotoneista.
- 3) Käytetään tilastollista tulkintaa havainnoiduista ilmiöistä ja vältetään dualismin kuvailua.
- 4) Heisenbergin epätarkkuusperiaate kvanttiolioille esitellään varhaisessa vaiheessa.
- 5) Vältetään Bohrin vetyatomin mallin käyttöä. (Fischler & Lichtfeld 1992).

Monien tutkijoiden mukaan klassisen fysiikan selkeä erottaminen kvanttifysiikasta on keskeisessä asemassa, jotta opiskelijoita voitaisiin kevyesti tukea ymmärtämään teorioiden erillisyyttä toisistaan. Esimerkiksi Krijtenburg-Lewerissa ym. (2017) toteavat, että opettajien on hyödyllistä pitää mielessään, että opiskelijat sekoittavat herkästi klassisen fysiikan tulkintoja kvanttifysiikan käsitteisiin, mikä johtaa helposti virheellisiin tulkintoihin kvanttifysiikan käsitteiden sisällöstä. Opettajien voi olla siksi hyödyllistä korostaa yhteneväisyyksiä ja erilaisuuksia kvanttifysiikan käsitteiden ja opiskelijoiden ennakkokäsityksen välillä. Opettaja voi myös muistuttaa metaforien rajoituksista, jotta niitä ei tulkittaisi liian kirjaimellisesti. (Krijtenburg-Lewerissa ym. 2017.)

Fischler ja Lichtfeldt (1992) linjaavat, että kvanttifysiikan opetuksessa on tärkeää kyetä muuttamaan vaikeita käsitteitä yksinkertaisemmiksi, jotta niitä voidaan mielekkäällä tavalla opettaa ja oppia. Kuitenkaan ei ole kehitetty sellaisia yleisiä periaatteita, joiden avulla tämä yksinkertaistus olisi syytä toteuttaa. Opetuksen toteutustapoja suunnitellessa on siis huomioitava, että yksinkertaistettujen mallien on oltava sellaisia, että niitä voidaan myöhemmin laajentaa, jotta opiskelijan ei tarvitse myöhemmin muuttaa aiemmin oppimiaan peruskäsitteitä. (Fischler & Lichtfeldt 1992.) Riskinä

liiallisessa yksinkertaistamisessa on, että käsitteet ymmärretään puutteellisesti, eikä väärinymmärretty käsite enää kuvaa teoriaa ja havaintoja tarpeeksi tarkasti, vaan muodostuu virhepäätelmä ja väärän käsityksen ydin.

Levrini ja Fantini (2013) pyrkivät tutkimuksellaan tukemaan väitettä, jonka mukaan tietyt yliyksinkertaistukset, joita käytetään apuna, kun fysiikasta halutaan saada helpommin omaksuttavaa, voivat aiheuttaa riskin siihen, että sisältö muuttuu vaarallisen paljon ja fysiikan oppimisen prosessi voi häiriintyä. Levrini ja Fantini (2013) esittelevät tutkimuksessaan esimerkkejä vaarallisista yksinkertaistuksista kvanttimekaniikan opetuksessa. Välttämättömät vaikeudet kvanttifysiikan oppimisessa voidaan kuitenkin heidän mukaansa muuntaa sellaisiksi kulttuurisiksi haasteiksi, jotka ovat myös lukiolaisten omaksuttavissa. He korostavat tutkimuksensa tuloksina, että pätevän pohjan antava opetus ei lyö laimin seuraavia perusteesejä, joita modernin fysiikan ymmärtäminen vaatii (Levrini ja Fantini, 2013):

- 1) Perusfysiikan käsitteiden uudelleenmäärittäminen, esimerkiksi klassisen objektin käsite;
- 2) Mielikuvituksen laajentaminen sellaisiin todellisuuksiin, jossa objektit eivät ole liioin hiukkasia tai aaltoja;
- 3) kehittyneiden formalismien käyttö kuvaamaan abstrakteja avaruuksia (esim. Hilbertin avaruus)
- 4) Kehitetään uusi epistemologinen kategoria, jossa mietitään uudelleen klassisia kategorioita, kuten kausaalisuus, determinismi, ja alisysteemien eroteltavuus.

Opettajan on tarkasti mietittävä, miten sanansa asettaa, koska oppilaiden käsitykset nojaavat monesti opettajan käyttämiin ilmaisuihin. Fischler ja Lichtfeldt (1992) mainitsevat esimerkin liittyen aaltohiukkasdualismiin: niin kauan kuin opettaja ilmaisee idean niin, että valo osoittaa hiukkasluonteisen käyttäytymisen joissakin kokeissa, opiskelijat pitävät kiinni ajatuksesta, että fotonit liikkuvat kuin klassisesti käyttäytyvät hiukkaset. Tutkijoiden mielestä olisi parempi, että hylätään puhe aaltohiukkasista, ja korostetaan sitä, että aine ja valo koostuvat kvanttiolioista, jotka käyttäytyvät eri tavalla kuin klassiset hiukkaset ja aallot. (Fischler & Lichtfeldt 1992.)

Stefanin ja Tsaparlisin (2009) mukaan tiedon fragmentoituminen esittää merkittävää roolia puutteellisen ymmärtämisen muodostumisessa. Jos opetuksessa tuodaan esille pelkästään irrallisia tietoja keskittymättä eri asioiden välisiin yhteyksiin, tiedosta ei

muodostu kokonaisuutta. Väärinymmärryksien syyt nojaavat sekä ohjaukseen ja opetusmateriaaliin, että itse kvanttiteorian luonteeseen: opiskelijat saattavat omaksua jonkun historiallisista kvanttiteorian tulkinnoista, jotka on myöhemmin todettu puutteellisiksi. (Stefani & Tsaparlis 2009.) Opetuksessa on pidettävä huolta, että opintokokonaisuuden sisällön piirissä säilyy selkeä kuva siitä, mikä on keskeistä ja oleellista. Tiedon pirstaloituminen ja kokonaisuuksien hallinnan puute lävistää koko informaatioajan olemassaoloa. Kaiken aikaa kasvavien tietovarantojen keskellä on välillä ongelmallista hahmottaa, mikä on oleellista ja mikä taas vähemmän oleellista tietoa kulloisenkin asiakokonaisuuden kannalta.

Margel, Eylon ja Scherz (2008) ehdottavat tutkimuksensa pohjalta, että aineen rakenteen opetuksessa kannattaa ottaa huomioon

- 1) Tarpeeksi vahvan pohjan rakentaminen aineen hiukkasluonteesta konstruktivistisen lähestymistavan avulla, joka rohkaisee ja kannustaa avoimiin keskusteluihin oppilaiden keskuudessa aineen rakenteesta.
- 2) Aineen rakenteen opettaminen useissa askelmissa käyttäen spiraalimallia, jossa perusideat esitetään, toistetaan, kerrataan, laajennetaan ja tarkennetaan.

Tämänkaltainen opetussuunnitelma tarjoaa mahdollisuuksia tiedon integraatioon ja kertaamiseen, jolloin oppilaat voivat tavoittaa syvällisemmän ymmärryksen. (Margel, Eylon & Scherz 2008.) Heidän näkemyksensä mukaan avoimen keskustelun käyminen auttaa aiheen syvällisessä ymmärtämisessä, ja tiedon opettaminen asteittain syventäen ja laajentaen tukee oppimista ja muistamista.

Tsaparlis ja Papaphotis (2002) käyvät läpi eräitä keinoja, jolla traditionaalista opetusta voitaisiin muuttaa siten, että oppimistulokset voisivat tukea paremmin oppilaiden käsitteellisen osaamisen muutosta syvällisempään suuntaan. He mainitsevat opetusstrategioina esimerkiksi yhdistämisen, jolla linkitetään samankaltaisia käsitteitä toisiinsa (esimerkiksi atomiorbitaalit ja molekyyliorbitaalit) ja eriyttämisen, jonka avulla tunnistetaan erilaisuuksia käsitteiden välillä (esimerkiksi kompleksinen tai reaalinen orbitaali). Tsaparlis ja Papaphotis (2002) tunnistavat, että opiskelijoiden on helpompi soveltaa harjoiteltuja algoritmisia sääntöjä, kuin ymmärtää käsitteellisiä kysymyksiä. Syvällisen ymmärryksen kehitystä voidaankin mahdollisesti tukea parhaiten käyttämällä opetuksessa sellaisia ajattelumalleja, jotka opiskelijoiden on helpointa omaksua. Algoritmisten sääntöjen kautta tapahtuva soveltaminen on

opiskelijoille luontevaa, joten käsitteiden omaksumista silmällä pitäen voitaisiin luoda selkeästi reseptinomaisia malleja tukemaan opiskelijoiden ajatus- ja oppimistyötä.

Joskus on tarpeen syventyä vastauksia haettaessa yksittäisen tutkimuksen tuloksiin, jotta saadaan laadullinen ulottuvuus tarkasteluun. Petri ja Niedderer (1998) keskittyivät tutkimuksessaan kuvaamaan yhden lukioikäisen opiskelijan oppimisprosessia kvanttifysiikan kurssilla. Tutkimuksessa pyrittiin kuvaamaan atomimallin asteittaista kehitystä opiskelijan ajatusten muodostamassa kognitiivisessa systeemissä. Käsityksiä tutkittaessa havaittiin, että opiskelijan käsitykset olivat toisenlaisia kuin opettaja oli tarkoittanut ja että opiskelijan tietomalli rakentuu sekä opiskelijan omaksumista tiedoista että opiskelijan metakognitiivisista fysiikkaa koskevista käsityksistä. (Petri & Niedderer 1998.)

Opiskelijan omaksumat mallit saattavat olla hyvin erilaisia kuin ne mallit, joita hänen otaksutaan omaksuneen opetuksen kautta. Käsitteellistä muutosta tutkineet DiSessa ja Sherin (1998) pohtivat, minkälaisesta muutoksesta on kyse, kun käsitteellinen muutos tapahtuu. DiSessa ja Sherin (1998) määrittävät käsitteellisen muutoksen sellaiseksi, jossa uskomusjärjestelmän muodostavat perustavanlaatuiset käsitteet muuttuvat. He esittävät käsitteiden luokitteluun apukeinoksi koordinaatioluokan käsitteen, jonka he näkevät tärkeäksi tieteen oppimisprosessissa. Koordinaatioluokalla he tarkoittavat sellaisia monimuotoisia tapoja, joilla ihmiset ymmärtävät ja tulkitsevat ympäristöstä saatavaa tietoa. (DiSessa & Sherin 1998.)

Opettajan tulisikin hahmottaa tarkasti oppilasta havainnoimalla, miten tämä tulkitsee ympäristöstä saamansa viestit. Oppilaan mielestä voi olla intuitiivista omaksua opetetut asiat hyvin toisenlaisella tavalla, kuin mihin opetuksen kautta on pyritty. Myös opettajan taustakäsitykset voivat vaikuttaa oleellisella tavalla siihen, kuinka hän opettaa. Lin ja Singh (2010) tutkivat eroja tavassa, jolla professorit ja opiskelijat kategorisoivat kvanttimekaniikan ongelmia. Heistä opiskelijoiden tapa järjestää ja kategorisoida ongelmia voi olla hyödyllinen työkalu sen ymmärtämiseen, kuinka opiskelijat hahmottavat ongelmia ja pyrkivät ratkaisemaan niitä. Professoreiden tapa järjestää ongelmia oli puolestaan hyvin samankaltainen fysiikan peruskurssia koskien, mutta kvanttimekaniikan ongelmien järjestäminen erilaisiin kategorioihin ei ollut professorien keskenkään niin suoraviivaista. Osalla professoreista kategoriat olivat abstraktimpia kuin toisilla. Lin ja Singh (2010) olisikin hyödyllistä jatkossa tutkia,

vaikuttaako opettajan tapaan opettaa kvanttimekaniikkaa läheisesti se, millaisella tavalla hän luokittelee kvanttimekaniikan ongelmia. (Lin & Singh 2010.)

Ayene ym. (2019) puolestaan pohtivat kvanttifysiikan ilmiöperustan poikkeuksellisuutta klassiseen fysiikkaan nähden. Opiskelijoilla ei ole kokemusta käsitteiden kytkeytymisestä päivittäiseen elinympäristöönsä ja kulttuuriseen kokemusmaailmaansa. Kvanttifysiikan ilmiöitä ei myöskään pystytä suoraan havainnoimaan. Opiskelijoilla saattaa olla kokemuksia laboratoriokokeista, tai opiskelukurssin opetuksen seuraamisesta, mutta suurimmalla osalla ei ole kulttuuriin sidottua kokemusta kvanttifysiikan ilmiömaailmasta. (Ayene ym. 2019.) Mahdollisesti tämän kaltaisiin ongelmiin voi auttaa oppilaiden opastaminen popularisoidun tieteen pariin, esimerkiksi tieteen historiasta kirjoitettujen yleistajuisten kirjojen lukemiseen.

Ensivaikutelmalla on merkitystä myös pedagogian saralla, kun opiskelijat käyttävät kvanttimekaniikan teorian avulla kehitettyjä jokapäiväisiä laitteita (Jones 1991). Opittavia asioita ei pitäisi yliyksinkertaistaa niin paljon, että teorian oppimisesta katoaa kaikki jännittävyys ja teorian avoimuus erilaisille ajatuksille. Jones (1991) näkee, että jokaisella sukupolvella on omat käsityksensä jaettavaksi opiskelijoille, mutta olisi jo aika hilata modernin fysiikan opetuksen alkamisajankohtaa 1900-luvusta edes 1930-luvulle.

4 Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019

Lukion opetussuunnitelman perusteiden uusin versio ilmestyi elokuussa 2019, ja lukiokoulutuksen järjestäjät ovat velvollisia soveltamaan määräystä lukio-opetuksessa syksystä 2021 alkaen. Lukiokoulutuksen uudistushanke käynnistettiin vuonna 2017, ja sen tavoitteena on nostaa kansakunnan koulutustasoa. Suomessa tarvitaan tulevaisuudessa asiantuntijaosaamista ja paljon korkeakoulutettua työvoimaa vastaamaan mm. kasvualojen työvoimatarpeeseen. Uudistuksella halutaan kasvattaa lukiokoulutuksen vetovoimaa, vahvistaa koulutuksen laatua ja mahdollistaa sujuva siirtyminen korkea-asteen opintoihin. Keskeisinä keinoina tavoitteisiin pääsemiseksi käytetään yksilöllisiä ja joustavia opintopolkuja, opintojen ohjausta ja tukemista, korkeakouluyhteistyötä ja oppiainerajoja ylittäviä opintokokonaisuuksia. (Opetushallitus 2019, 9.)

Uudistuksen jälkeen lukiokoulutus on edelleen kolmivuotinen koulutus, ja se järjestetään erikseen nuorille ja aikuisille tarkoitettuina oppimäärinä. Mitoituksen perusteena oppimäärille ja niihin kuuluville opinnoille käytetään aiemman kurssiperusteisuuden sijaan opintopisteitä. Uuden vastaavuuden mukaan yksi entinen kurssi on laajuudeltaan kaksi opintopistettä, ja yhden opintopisteen laajuus on laskennallisesti 19 x 45 minuutin oppituntia tai 11,4 x 75 minuutin oppituntia. Lukion oppimäärän laajuus on nuorille tarkoitettussa koulutuksessa vähintään 150 opintopistettä ja aikuisille tarkoitettussa lukiokoulutuksessa vähintään 88 opintopistettä. Valtakunnallisesti valinnaisia opintoja (joihin myös modernin fysiikan osuus lukion fysiikan opinnoista kuuluu) nuorten lukiokoulutuksen oppimäärässä tulee sisältää vähintään 20 opintopisteen edestä. (Opetushallitus 2019, 9.)

Tässä luvussa esitellään opetussuunnitelman perusteiden sisältöä yleisellä tasolla ja koskien fysiikan ja erityisesti modernin fysiikan sisältöä opintojaksossa Aine, säteily ja kvantittuminen.

4.1 Opetuksen yleiset tavoitteet ja laaja-alainen osaaminen

Kaikkien oppiaineiden yhteiset tavoitteet ovat seuraavat: 1) hyvinvointiosaaminen 2) vuorovaikutusosaaminen 3) monitieteinen ja luova osaaminen 4) yhteiskunnallinen osaaminen 5) eettisyys ja ympäristöosaaminen ja 6) globaali- ja kulttuuriosaaminen. (Opetushallitus 2019, 9). Näitä kaikille oppiaineille yhteisiä tavoitteita kutsutaan laaja-alaisen osaamisen osa-alueiksi, ja niiden merkitys on eheyttää ja yhtenäistää lukiokoulutuksen kokonaisuutta. Jokaisen lukiolaisen on myös halutessaan saatava mahdollisuus kerätä kokemusta korkeakouluopinnoista sekä kehittää kansainvälistä osaamistaan ja yrittäjyys- ja työelämäosaamistaan. (Opetushallitus 2019, 10).

Opetussuunnitelman perusteiden mukaan laaja-alaisen osaamisen osa-alueita opiskeltaessa on tarkoitus, että opiskelija analysoi nykyajan ilmiöitä sekä oppii etsimään hyvän tulevaisuuden rakentamisen elementtejä. Hän oppii esittämään perusteltuja käsityksiä ja rohkaistuu toimimaan eettisesti sekä saa mahdollisuuksia osaamisen jakamiseen ja vertaisoppimiseen ja -ideointiin. (Opetushallitus 2019, 61.)

4.1.1 Yleiset tavoitteet

Lukiokoulutuksessa opetus järjestetään siten, että opiskelijalla on mahdollisuus kasvaa sivistyneeksi yhteiskunnan jäseneksi, hankkia muuttuvassa toimintaympäristössä tarvittavia tietoja ja taitoja ja kehittää jatkuvaan oppimiseen tarvittavia opiskelutaitoja (Opetushallitus 2019, 58). Lukion sivistysihanteena pidetään pyrkimystä hyvyyteen, totuuteen, oikeudenmukaisuuteen, kauneuteen ja rauhaan (Opetushallitus 2019, 17). Tietojen ja taitojen omaksumisessa korostuu laaja-alainen monipuolisuus oppiainerajat ylittäen. Opiskelija kehittyy tiedon hankkimisessa ja soveltamisessa sekä ongelmanratkaisussa. Opiskelija harjaantuu tarkastelemaan ilmiöitä eettisesti ja hänen ymmärryksensä ihmisen toiminnan vaikutuksista ympäristön tilaan vahvistuu. Hän saa kokemuksia tutkivasta oppimisesta ja osallisuudesta tieteen ja tutkimuksen tekoon, sekä tottuu arvioimaan tiedon luotettavuutta. Opetuksen tehtävänä on ohjata opiskelijaa käyttämään tieto- ja viestintäteknologiaa tarkoituksenmukaisesti, turvallisesti ja vastuullisesti. (Opetushallitus 2019, 58.)

Lukiokoulutuksen yleisiin tavoitteisiin lukeutuu mm. opiskelijan vuorovaikutus-, yhteistyö- ja ilmaisutaitojen vahvistaminen. Opiskelijan on tarkoitus oppia tuntemaan omia vahvuuksiaan ja kehityskohteitaan opiskelutaitojen suhteen ja pyrkiä vahvistamaan itseohjautuvuuttaan opintoihin sitoutumisen kautta. Opetuksen kautta opiskelija saa tietoja ja kokemuksia koulutusmahdollisuuksista, työelämästä ja yhteiskunnasta. Niiden avulla hän voi suunnitella omaa tulevaisuuttaan jatkokoulutuksessa ja työelämässä, sekä kotimaassa että kansainvälisesti. (Opetushallitus 2019, 59.)

4.1.2 Laaja-alainen osaaminen lukiossa

Laaja-alaisen osaamisen tarkoitus on eheyttää lukiokoulutusta (Opetushallitus 2019, 60). Lukiokoulutuksen mukainen yleissivistys rakentuu oppiainekohtaisista tiedonalakohtaisesta sisällönosaamisesta, jota laaja-alainen osaaminen tukee ja syventää. Laaja-alaista osaamista kehittävässä opinnoissa opiskelijalle tarjotaan mahdollisuus syventää osaamistaan tarkastelemalla monitahoisia kulttuurisia ja yhteiskunnallisia ilmiöitä ja niiden yhteyksiä ja riippuvuuksia. Opiskelijan tulisi oppia soveltamaan aiemmin opittua, sekä hakemaan, tulkitsemaan, arvottamaan, jakamaan ja tuottamaan tietoa eri muodoissa, ympäristöissä ja erilaisten välineiden avulla.

Laaja-alaista osaamista on tarkoitus täydentää ja konkretisoida paikallisissa opetussuunnitelmissa kunkin oppiaineen kohdalla ja jokaisen opintojakson yhteydessä (Opetushallitus 2019, 62). Laaja-alaisen osaamisen tavoitteet ovat (Opetushallitus 2019, 60)

- hyvä yleissivistys
- kestävän tulevaisuuden rakentaminen
- vahvat jatko-opinto-, työelämä- ja kansainvälisyysvalmiudet.

Seuraavaksi tarkastellaan yksityiskohtaisemmin laaja-alaisen osaamisen osa-alueisiin liittyviä tavoitteita.

Hyvinvointiosaamisen kehittymistä on se, että opiskelija ymmärtää terveyden ja terveellisten elämäntapojen merkityksen ja osaa pitää yllä ja vaalia niin fyysistä, psyykkistä, kuin sosiaalista toimintakykyään ja hyvinvointiaan (Opetushallitus 2019, 62). Lukio-opintojen tavoitteena on edistää opiskelijan kykyä sietää pettymyksiä, kehittää hänen sinnikkyytään ja luottamusta tulevaisuuteen. Osana lukio-opintoja tutustutaan keinoihin, joilla edistetään yhteisöjen ja ekosysteemien hyvinvointia globaalisti kulttuurin ja yhteiskunnan tasolla. Opiskelijaa rohkaistaan aktiiviseen toimintaan oman ja toisten hyvinvoinnin ja turvallisuuden hyväksi. (Opetushallitus 2019, 62.)

Vuorovaikutusosaamisen lähtökohdaksi opetussuunnitelman perusteissa tunnistetaan myötätunto, joka mahdollistaa merkityksellisyyden tunteen (Opetushallitus 2019, 62). Opiskelija saa kokemuksen lukioyhteisöön kuulumisesta ja tulee kuulluksi omana itsenään. Osa vuorovaikutustaitoja ovat tunteiden käsittely-, tunnistus- ja hallintataidot sekä toisten tunteiden ja näkemysten kuunteleminen, kunnioitus ja ennakointi. Vuorovaikutuksessa toisten kanssa pyritään rakentavuuteen ja syvennetään taitoja hallita konfliktitilanteita ja ristiriitoja sovittelevasti ja rakentavasti. Vuorovaikutustaitoja opitaan yhteistyössä erilaisissa ympäristöissä. (Opetushallitus 2019, 62-63.)

Monitieteinen ja luova osaaminen on opetuksen osa-alue, jossa opiskelija saa edellytyksiä pohtia toiminnan, näkemysten ja ajattelun eettisiä, esteettisiä ja ekologisia arvolähtökohtia (Opetushallitus 2019, 63). Hän oppii tuntemaan ja harjaantuu käyttämään erilaisia tiedonhankinnan ja -esittämisen tapoja ja kehittää taitojaan arvioida tiedon luotettavuutta. Samalla opiskelija tottuu arvioimaan tiedon merkittävyyttä ja tarpeellisuutta elämänhallinnan, työ- ja jatkokoulutus suunnitelmien sekä erilaisten yhteisöjen kannalta. Opiskelija saa opetuksen kautta mahdollisuuksia ratkaista monimutkaisia ongelmia ja hänen monilukutaitojaan tulee syventää tavoitteellisesti. Osana lukio-opintoja pohditaan, kuinka digitalisaatio ja teknologia tukevat yhteisöjen ja yksilöiden kyvykkyyksiä, sekä mietitään tulevaisuuden kannalta kestäviä ratkaisuja, joissa huomioidaan politiikan, teknologian, talouden ja ympäristön välisiä yhteyksiä sekä tulevaisuusskenaarioita. (Opetushallitus 2019, 63.)

Yhteiskunnalliseen osaamiseen kuuluu muun muassa se, että opiskelijaa tuetaan sisäistämään yritteliäs ja uudistumishenkinen asenne eri elämänalueilla (Opetushallitus 2019, 64). Opiskelijan toivotaan harjaantuvan sietämään epäonnistumisia, turhautumista ja epävarmuutta, sekä suhtautuvan tulevaisuuteen avarakatseisesti ja rohkaistuvan ottamaan perusteltuja riskejä. Hän ymmärtää ja arvostaa oikeudenmukaisen ja demokraattisen sekä yhdenvertaisuuteen ja tasa-arvoon perustuvan yhteiskunnan rakenteita ja toimintaperiaatteita. Hän oppii toimimaan aktiivisena kansalaisena. Opetuksessa tehdään näkyväksi opiskelijan oman työskentelyn merkitystä hyvän tulevaisuuden rakentamisessa. (Opetushallitus 2019, 64.)

Eettisyyden ja ympäristöosaamisen taitoihin lukeutuu muun muassa opiskelijan kyky suunnitella ja arvioida toimintaansa vastuullisuuden ja eettisyyden lähtökohdista. Kestävän elämäntavan ekologiset, taloudelliset, sosiaaliset ja kulttuuriset ulottuvuudet ja keskinäisriippuvuudet ovat osa aihepiirin hallintaa perusasioiden tasolla, ja opiskelijan ymmärrys lisääntyy rajallisten luonnonvarojen ja niiden kestävän käytön osalta. Opiskelija saa tutustua tutkimustietoihin ja käytäntöihin, jotka liittyvät ilmastomuutoksen hillitsemiseen sekä luonnon monimuotoisuuden turvaamiseen. (Opetushallitus 2019, 64.)

Globaali- ja kulttuuriosaaminen näkyy opiskelijan taidoissa oppia ymmärtämään perusasiat globalisaatiosta ja siitä, miten se vaikuttaa erilaisissa olosuhteissa elävien ihmisten mahdollisuuksiin elää kestävän elämäntavan mukaista elämää. Opiskelijalle mahdollistetaan lukio-opetuksen kautta kokemuksia opiskelusta, yhteistyöstä ja eettisestä toimijuudesta erilaisia kansainvälisyyden toimintamuotoja ja teknologiaympäristöjä hyödyntämällä. (Opetushallitus 2019, 65.)

4.2 Fysiikka – oppiaineen tehtävä ja laaja-alainen osaaminen oppiaineen tasolla

Uudessa lukion opetussuunnitelmassa fysiikan tehtävä oppiaineena määritellään siten, että opetuksen tulee tukea opiskelijan luonnontieteellisen ajattelun ja maailmankuvan kehittymistä osana monipuolista yleissivistystä (Opetushallitus 2019, 249). Oppiaineen tehtävän kuvauksessa korostetaan sitä, että opetuksen tulisi ohjata opiskelijaa ymmärtämään fysiikan merkitys jokapäiväisessä elämässä, ympäristössä, yhteiskunnassa ja teknologiassa. Opetuksen lähtökohtana pidetään ympäristöstä tehtyjä havaintoja, opiskelijoiden luonnontieteellistä lukutaitoa pyritään kehittämään ja antamaan opiskelijalle valmiuksia jatko-opinnoissa menestymistä varten. Opetusta pyritään rakentamaan ottaen huomioon opiskelijan aikaisemmat kokemukset ja havainnot sekä johdattamaan kohti uusia havaintoja ja näkökulmia. Kokeellisuus työturvallisuutta noudattaen on keskeinen piirre fysiikan opetuksessa. (Opetushallitus 2019, 249.)

Laaja-alaista osaamista fysiikka tukee oppiaineena monenlaisin tavoin. Yhteiskunnallinen osaaminen kehittyy opetuksen kautta, kun opiskelija saa opetuksen kautta valmiuksia osallistua yhteiskunnalliseen keskusteluun ja vaikuttaa yhteiseen päätöksentekoon. Vuorovaikutusosaaminen kehittyy monipuolisten työtapojen, mm. projektioppimisen ja ryhmätyöskentelyn avulla. Eettisyyden ja ympäristöosaamisen, globaali- ja kulttuuriosaamisen ja hyvinvointiosaamisen tavoitteita fysiikka oppiaineena tukee seuraavin keinoin:

- opetuksen välittämä kuva fysiikan merkityksestä kestävänsä tulevaisuuden rakentamisessa
- opetus ohjaa opiskelijaa ottamaan vastuuta omasta toiminnastaan ja ympäristöstä
- opetus ohjaa opiskelijaa käyttämään fysiikan osaamistaan kestävänsä tulevaisuuden rakentamisessa
- opetus ohjaa arvioimaan luonnonvarojen kestävänsä käyttöä, ympäristö- ja terveysvaikutuksia ja energiantuotantotapoja

Monitieteistä ja luovaa osaamista sekä teknologiaosaamista fysiikka oppiaineena kehittää erilaisten kirjallisten ja visuaalisten tuotosten avulla. Tieto- ja

viestintäteknologiaa käytetään fysiikassa esimerkiksi tiedon etsimiseen, kokeellisten havaintojen keräämiseen, mittaustulosten käsittelyyn ja tulkitsemiseen, omien tuotosten laatimiseen ja esittämiseen sekä mallintamiseen ja simulointiin. (Opetushallitus 2019, 250.)

4.3 Fysiikan opetuksen yleiset tavoitteet ja arviointi

Fysiikan opetuksessa yleisesti tavoitteet liittyvät fysiikan merkitykseen, arvoihin ja asenteisiin sekä tutkimisen taitoihin ja fysiikan tietoihin ja niiden käyttämiseen (Opetushallitus 2019, 250).

Merkityksille, arvoille ja asenteille opetussuunnitelman perusteet linjaavat, että opiskelija osaa arvioida fysiikan ja teknologian merkitystä yhteiskunnan ja yksilön tasolla, sekä perehtyy fysiikan osaamiseen ja soveltamiseen omia tavoitteitaan toteuttaessaan ja muissa monipuolisissa tilanteissa. Opiskelijoille tulee myös taata mahdollisuus tutustua fysiikan sovelluksiin vierailujen ja korkeakoulu- ja työelämäyhteistyön kautta sekä saada jatko-opintokelpoisuus luonnontieteellisille ja fysiikkaa soveltaville aloille sekä koota itselleen valmiuksia osallistua ympäristöä ja teknologiaa koskevaan keskusteluun ja päätöksentekoon. (Opetushallitus 2019, 250-251.)

Tutkimisen taitojen osalta pidetään tavoitteena, että opiskelija ymmärtää luonnontieteellisen tiedon luonnetta ja tiedon kehittymistä sekä tieteellisen tavan tiedon tuottamisen prosessissa (Opetushallitus 2019, 251). Opiskelijan tulisi osata muodostaa kysymyksiä ilmiöistä ja kehittää kysymyksiä muun ongelmanratkaisun lähtökohdiksi sekä osata suunnitella ja toteuttaa kokeellisia tutkimuksia yhdessä muiden kanssa. Myös mittauksen virhelähteiden tunnistaminen ja tutkimusten tulosten käsittely, tulkinta ja arviointi kuuluvat tutkimuksen teon tavoiteltaviin taitoihin. (Opetushallitus 2019, 251.)

Fysiikan tietojen ja taitojen käyttämisen osalta pidetään tavoiteltavana, että opiskelija osaa käyttää fysiikan keskeisiä käsitteitä johdonmukaisesti ja oikeissa asiayhteyksissä sekä osaa ilmaista johtopäätöksiä ja näkökulmia fysiikalle ominaisella tavalla. Opiskelijan tulisi ymmärtää fysiikan ilmiöitä ja periaatteita teknologisten sovelluksien taustalla sekä osata tulkita ja muodostaa erilaisia malleja sekä käyttää niitä sekä

simulaatioita ilmiöiden kuvaamiseen ja ennusteiden tekemiseen. Opiskelijan tietolähteiden käytön tulisi olla monipuolista ja hänen tulisi kyetä arvioimaan tietolähteitä kriittisesti sekä kyetä käyttämään asianmukaisia ohjelmia mallintamisen, ratkaisemisen ja tulosten ilmaisemisen apuvälineenä. (Opetushallitus 2019, 251)

Fysiikan arvioinnin tulisi tukea opiskelijaa osaamisensa tiedostamisessa ja kehittämisessä sekä kehittää opiskelijan itsearvioinnin taitoja. Arvioinnin tulee perustua monipuoliseen näyttöön sekä opiskelijan tietojen ja taitojen havainnointiin. Tuotosten lisäksi arvioidaan opiskelijan työskentelyä. (Opetushallitus 2019, 251)

4.4 Modernin fysiikan tavoitteet lukion opetussuunnitelmassa

Modernia fysiikkaa on kahdessa aiemmassa opetussuunnitelmassa opetettu lukion viimeisessä kurssissa, ja uusi lukion opetussuunnitelma sijoittaa myös modernin fysiikan opetuksen viimeiseen moduulin. Uudessa moduulissa kvantittuminen on nostettu keskeiseksi käsiteltäväksi aiheeksi jo otsikkotasolla (vrt. aiemmin FY8 eli valtakunnallinen 8. kurssi on ollut nimeltään Aine ja säteily, nyt 8. moduulin nimi on Aine, säteily ja kvantittuminen). Opetussuunnitelman perusteissa esitetään, että ”moduulissa perehdytään kvanttifysiikan käsitteelliseen ja teoreettiseen rakenteeseen ja niiden kokeelliseen pohjaan” (Opetushallitus 2019, 257).

Tavoitteita moduulin opetukselle on nimetty kolme:

Moduulin opiskeltuaan opiskelija

- tuntee ionisoivan säteilyn vaikutukset ja tutustuu säteilyn turvalliseen käyttöön
- tutustuu kvanttifysiikkaan perustuvaan maailmankuvaan alkeishiukkasfysiikasta kosmologiaan
- ymmärtää kvantittumiseen perustuvan teknologian merkityksen nyky-yhteiskunnassa. (Opetushallitus 2019, 257.)

Keskeisinä sisältöinä nähdään aineen rakenne ja perusvuorovaikutukset ja se, miten nämä vaikuttavat aineen ominaisuuksiin. Kvanttifysiikan teknologiset sovellukset nostetaan käsittelyyn sekä kvanttifysiikan ilmenemisen laaja skaala alkeishiukkastason nanomittakaavasta kosmisen mittakaavan ilmiöihin saakka. Myös erilaiset ionisoivaan

säteilyyn, kvantittumiseen ja radioaktiiviseen hajoamiseen perustuvat teknologiat nostetaan tarkastelun kohteeksi. (Opetushallitus 2019, 257.)

4.5 Modernin fysiikan keskeiset sisällöt lukion opetussuunnitelmassa

Keskeiset sisällöt on uudessa lukion opetussuunnitelmassa listattu seuraavasti:

- energian kvantittuminen aineen ja säteilyn vuorovaikutuksessa
- fotonin sähkömagneettisen säteilykentän kvanttina
- atomin rakenne, atomin elektronien kvanttitilat ja aaltomekaanisen atomimallin periaate
- kvantittumiseen perustuva teknologia: laser ja kvanttirakenteet
- atomiytimen rakenne ja muutokset, radioaktiivinen hajoaminen
- ydinreaktiot, massan ja energian ekvivalenssi, ytimen sidosenergia
- ydinvoima, fissio ja fuusio
- hajoamislaki
- ionisoivan säteilyn lajit ja biologiset vaikutukset sekä soveltaminen lääketieteessä ja teknologiassa
- hiukkasfysiikan standardimalli
- maailmankaikkeuden kehitys (Opetushallitus 2019, 257)

Uusista lukion opetussuunnitelman perusteista saa vaikutelman, että keskeistä sisältöä opintokokonaisuuteen on määritelty enemmän ja sisältöä on ohjattu enemmän kuin aiemmissa opetussuunnitelmien perusteissa. Uutta on mm. säteilyn käytön soveltamisen tarkastelu erityisesti lääketieteen kentässä. Teknologiset sovellukset kuten laserin toiminta on tuotu vahvemmin esiin keskeisessä sisällössä kuin aiemmin.

Lisäksi on annettu uutena ohjeistuksena myös esimerkkejä temaattisista yhteyksistä keskeisten sisältöjen käsittelyyn: säteilyturvallisuus, säteilyn käyttö lääketieteessä, ilmastonmuutos ja kasvihuoneilmiö. Keskeisiä sisältöjä on arvioitu voitavan tarkastella seuraavien kokeiden avulla: spektrin mittaaminen, spektrin muutoksen tarkastelu fluoresenssi-ilmiössä, mittaukset laserdiodeilla ja moduulin aihepiiriin liittyvät simulaatiot.

5 Näkökulmia modernin fysiikan opetukseen lukiossa

Tässä kappaleessa perehdytään siihen, millaisia opetusratkaisuja Aine, säteily ja kvantittuminen -opetusmoduulissa voitaisiin tehdä opetuksen tutkimuksen valossa. Tunnistetuista ratkaisuehdotuksista on nostettu otsikkotasolle lähestymistapa, jota voitaisiin tutkimuksen perusteella soveltaa opetuksessa. Erityisesti on nostettu esiin ideoita siitä, millaista laaja-alaisen sivistyksen tavoitetta tai muuta fysiikan opetuksen tavoitetta lähestymistapa voisi tukea opetuksen tasolla.

Yleisellä tasolla sopivan tiivistyksen tarkoituksenmukaisista opetusmetodeista luonnontieteiden opetuksessa tuovat esiin Juuti ja Lavonen (2016). He lainaavat Next Generation Science Standards -projektin ajatuksia, joiden mukaan luonnontieteellinen menetelmä kirkastuu oppilaille opetusmetodeilla, joiden kautta oppilaita tuetaan

- kysymään kysymyksiä
- kehittämään ja käyttämään malleja
- suunnittelemaan ja toteuttamaan tutkimuksia
- analysoimaan ja tulkitsemaan dataa
- käyttämään matemaattista ja laskennallista ajattelutapaa
- rakentamaan selitysmalleja
- sitoutumaan argumentteihin, joille on todisteita
- keräämään, arvioimaan ja keskustelemaan tiedosta/informaatiosta (Juuti ja Lavonen 2016.)

Lisäksi Juuti ja Lavonen (2016) suosittavat kehittämään opettajajohtoisista demonstraatioista sellaisia, että ne tukevat keskustelua ja oppilaiden ajattelua.

Oppilaiden arviointia voi olla perusteltua kehittää siihen suuntaan, että opetuksen tuloksina mitattaisiin tarkemmin ymmärtämistä ja tiedon syvällisen tason omaksumista. Muun muassa Johnston, Crawford ja Fletcher (1998) pohtivat, olisiko tarpeen kehittää arviointityökaluja sellaisiksi, että ne mittaisivat syvällistä oppimista pintatiedon omaksumisen sijaan.

Lukion opetussuunnitelman perusteiden mukaisen arvioinnin toteutuksessa on myös hyvä huomioida, että vaikka opetusta järjestettäisiin oppiainerajat ylittäen, on oppiaineet kuitenkin arvioitava oppiaineiden arviointikriteerejä noudattaen. Esimerkiksi jos päätetään toteuttaa 4 opintopisteen laajuinen opintojakso yhdistäen 2

opintopisteen laajuinen moduuli fysiikkaa ja 2 opintopisteen laajuinen moduuli kemiaa, molemmista oppiaineista annetaan arvosana kyseessä olevan opintojakson arvioinnissa. (Opetushallitus 2019, 46).

5.1 Klassisen fysiikan ja kvanttifysiikan erojen korostaminen

Aiemmin opitut mallit voivat tunnetusti häiritä uuden asian oppimista. Kvanttifysiikan käsitteiden hahmottamisessa klassisen fysiikan mallit saattavat vaikeuttaa asian omaksumista, jos lähtökohtaisena ajattelurakenteena toimii se, että kvantit käyttäytyvät kuten klassinen fysiikka ennustaa. Parhaiten kvanttifysiikan opetusta tuetaan erottelemalla selkeästi klassisen fysiikan ajattelumallit kvanttifysiikasta. Tutkimuksista saadut tulokset ovat rohkaisevia sen suhteen, että opiskelijat kykenevät erojen korostamisen avulla paremmin hahmottamaan uudenlaista lähestymistapaa.

Kalkanis, Hadzidaki ja Stavrou (2003) tutkivat, onko mahdollista löytää sellaisia opetusstrategioita, joilla voidaan opettaa kvalitatiivisella tasolla kvanttifysiikkaa sellaisille opiskelijoille, joilla ei ole matemaattista taustaa, joka vaadittaisiin varsinaisen matemaattisen formaalin kvanttiteorian omaksumiseen. Kvanttifysiikan perusideoita voitaisiin siis esitellä oppilaille jo varhaisessa vaiheessa fysiikan opintoja. Kalkanis ym. (2003) rohkaisevat rakentamaan opetusta sen varaan, että klassinen fysiikka ja kvanttifysiikka esitellään kahtena erilaisena käsiterakenteena alusta alkaen, jotta väärinymmärryksiä voitaisiin minimoida.

Baily ja Finkelstein (2009) toteavat myös, että klassisen fysiikan näkökulma fysiikkaan voi olla ongelmallinen, kun opiskellaan johdantokurssia kvanttimekaniikkaan. Opiskelijoiden on omaksuttava uusia näkökulmia kyetäkseen kunnolla tulkitsemaan kvanttifysiikkaa. Tutkimuksessaan Baily ja Finkelstein (2009) havaitsivat, että vaikka johdantoa kvanttifysiikkaan on jo opiskeltu, opiskelijoilla oli silti klassisesta fysiikasta omaksuttu lähestymistapa myös sellaisissa konteksteissa, joissa tarvittaisiin kvanttifysiikan lähestymistapaa. Baily ja Finkelstein (2009) uskovat, että tähän voidaan vaikuttaa opetuksella, koska erilaisilla oppimistavoitteilla on todettu erilaisia tuloksia oppimisen suhteen. He myös havaitsivat, että yleisesti ottaen opiskelijat eivät käytä klassisen fysiikan näkökulmaa tai kvanttifysiikan näkökulmaa johdonmukaisella tavalla. (Baily & Finkelstein 2009.)

Opetuksessa on syytä ottaa huomioon opiskelijoiden vaikeudet käsitteiden käyttämisessä johdonmukaisesti. Tämän ongelman ratkaisemiseksi olisi hyvä korostaa uudenlaisen ajattelumallin muodostamisen tärkeyttä, jotta klassinen lähestymistapa voidaan erottaa kvanttifysiikan mallista.

Klassisen fysiikan ja kvanttifysiikan erojen korostaminen tukee mm. opiskelijan luovuuden ja analyyttisen osaamisen karttumista lukio-opetuksen laaja-alaisen tavoitteiden rinnalla. Oppijan luovuuden kehittymiselle tuo hyvää harjoitusta vaihtaa ajattelutapaa täysin toisenlaiseksi siihen nähden, mitä on tottunut käyttämään aiemmin.

5.2 Kokeellisuus ja sensomotoriset kokemukset

Kokeellisuutta pidetään tärkeänä osana koko fysiikan tieteenalaa, ja sen merkitys on fysiikassa keskeinen. Kokeellisuuden toteuttaminen modernin fysiikan opetuksessa voi vaikuttaa opetuksessa haastavammalta kuin klassisen fysiikan opetuksessa, mutta on varmasti mahdollista ja suotavaa ymmärryksen tukemiseksi.

Ke, Monk ja Duschl (2005) raportoivat taiwanilaisten fysiikan opiskelijoiden ymmärrystä kvanttimekaniikan selitysmalleista atomitaso ilmiöissä. Heidän havaintonsa liittyivät siihen, että opiskelijat perustivat mentaaliset mallinsa sensomotorisiin kokemuksiinsa (esimerkiksi hyppimiseen portailla) ja että eri oppimisen vaiheisiin sijoittuvat opiskelijat hahmottivat eri tavalla klassisen ja kvanttifysiikan eroja. Toiset opiskelijat kykenivät jo erottamaan kvanttifysiikan selitysmallit klassisen fysiikan käsitteistä, toiset taas käyttivät käsitteitä sekaisin ilman selkeää tiedostamista käsitteiden perustason eroista. (Ke ym. 2005.)

Kokeellisuus voisikin tarkoittaa myös muita asioita kuin mitä perinteisellä kokeellisuudella saadaan aikaan, ja liittyä siihen, miten käsitteitä hahmotetaan. Portailla hyppiminen, kiven heittäminen veteen ja pinta-aaltojen tarkastelu kiven kohdatessa vedenpinnan, ja monet muut arkiset asiat voivat tarjota tukea käsitteiden hahmottamiselle, kun konkreettisen tason tapahtumia käytetään analogioina teoreettisille käsitteille kuten energiatasoille tai kentän käsitteelle.

Ke ym. (2005) näkevät tärkeäksi sen, että opiskelijat saavat tehdä kokeellisia töitä seisovien aaltojen erilaisista konfiguraatioista ja diffraktiomalleista, jotta

kvanttifysiikan omaksuminen olisi heille tehokkaampaa. Opiskelijoiden tulisi myös antaa oppimisen vahvistamiseksi muodostaa ja ilmaista näkemyksensä sekä testata oppimaansa.

Ke ym. (2005) pitävät tärkeänä sitä, että opetukseen sisällytetään sensomotorisia esimerkkejä seisovien aaltojen erilaisista muodoista viivoina, suljettuina ja tasopinnoilla sekä esimerkkejä valon ja elektronien diffraktiokuvioista. Ilman näitä esimerkkejä opiskelijat eivät saa tarvittavia työkaluja mentaalisten mallien ja skeemojen rakentamiseen. Ken ym. (2005) kanta on, että historiallinen lähestymistapa fysiikan oppimiseen ei riitä, vaan ajattelun, opetuksen ja oppimisen keskiössä ovat erityisesti merkitykselliset sensomotoriset kokemukset.

Perinteisen kokeellisuuden kautta opiskelija oppii hahmottamaan ympäristönsä ilmiöitä ja tuottamaan tietoa ympäristöstään erilaisten välineiden avulla, mikä on olennainen osa lukio-opetuksessa tavoiteltavan laaja-alaisen sivistyksen ihannetta. Sensomotoristen kokemusten käyttö voi edistää opiskelijan kykyä yhdistellä asioita mielessään luovalla tavalla.

5.3 Ajatuskokeet ja filosofia

Ajatuskokeilla on erityinen historiallinen merkitys fysiikan tieteen alalla. Monen kuuluisan fysiikan teorian lähtökohtana on ollut ajatuskokeelle ominainen kysymys: ”mitä jos...?” Klassinen esimerkki ajatuskokeesta teorian lähtökohtana on Albert Einsteinin 16-vuotiaana itselleen esittämä kysymys siitä, miltä valonsäde näyttäisi, jos sen vieressä pystyisi juoksemaan? (Kaku 1998) Tämän ajatuskokeen viitoittama tie johdatti nuoren Einsteinin kehittämään yhden fysiikan historian tunnetuimmista teorioista eli suhteellisuusteorian. Hadzidaki (2008) kutsuukin ajatuskokeita mielikuvituksen työkaluiksi, joiden avulla voi tutkia luonnonilmiöitä. Ajatuskokeiden käyttäminen opetuksessa on todella varteenotettava opetusmenetelmä.

Henriksenin, Angellin, Vistnesin ja Bungumin (2018) mukaan kvanttifysiikan opettaminen lukio-opiskelijoille pitää sisällään tiettyjä haasteita. Matemaattinen formalismi, jolla kvanttifysiikkaa ilmaistaan, on osittain liian edistynyttä lukiolaisille. Kvanttifysiikan filosofinen luonne sen sijaan voisi kiinnostaa sellaisiakin opiskelijoita, jotka eivät innostu fysiikasta sen vuoksi, että opetuksessa keskitytään toistamaan

kaavoja ja löytämään oikeita vastauksia. Lähestymistavat, joissa keskitytään oppimiseen yhteistyössä, keskusteluun ja filosofisiin kysymyksiin voisivat laajentaa perinteistä tapaa opettaa fysiikkaa, ja sisällyttää fysiikan opetukseen piirteitä, jotka kiinnostaisivat useampia opiskelijoita. (Henriksen ym. 2018.)

Ajatuskokeita hyväksikäyttämällä voidaan luontevasti tuoda fysiikan opetukseen myös opetussuunnitelman kannalta keskeistä tavoitteellista sisältöä yhteistyöstä ja yhteiskunnallisesta osallistumisesta. Muun muassa maailmankaikkeuden kehityksen käsitteleminen opetuksessa tarjoaa otollisen lähtökohdan keskusteluille, joita voidaan käydä myös filosofisella tasolla. Tätä kautta muodostuu mahdollisuus rakentaa ajatuskokeita sen pohjalta, miten maailmankaikkeus on muodostunut (tai voisi muodostua), kun oletetaan tai tiedetään tiettyjä asioita.

Esimerkiksi Pereira (2019) esittelee artikkelissaan tavan tarkastella pimeän energian vaikutuksia jokapäiväiseen elämään maapallolla. Lähestymistapa on suunnattu ensimmäisen vuoden yliopisto-opiskelijoille ja lukiolaisille. Lähestymistavassa käytetään perustason käsitteitä Newtonin fysiikasta skenaariossa, jossa kosmologinen vakio voisi aiheuttaa vastavoiman Maan painovoimakentälle. (Pereira 2019.)

Karakostas ja Hadzidaki (2005) puolestaan pyrkivät tutkimuksellaan osallistumaan filosofiseen dialogiin, joka koskee fysikaalista todellisuutta ja kvanttimekaniikan opetusprosessia. Karakostas ja Hadzidakin (2005) mukaan realistinen tulkinta kvanttimekaniikasta ei ole ainoastaan mahdollinen, vaan myös tarpeellinen, jotta kvanttimekaniikan teorian tieteellinen sisältö ymmärrettäisiin syvällisesti. Kvanttiteorian realistinen tulkinta vaatii kuitenkin klassisen käsitteistön hylkäämistä, mikä voi olla opiskelijoille haasteellista. (Karakostas & Hadzidaki 2005.)

Karakostas ja Hadzidaki (2005) ehdottavat ratkaisuksi opetuksessa käytettäväksi epistemologista rakennetta ”Todellisuuden tasot” (eng. ”Levels of Reality”). Rakenteessa fysikaaliset ilmiöt on jaettu erillisiin tasoihin (esimerkiksi klassisen fysiikan taso ja kvanttifysiikan taso), jotka esittävät itsenäisiä käsitteellisiä systeemejä vastaavissa teorioissa. Todellisuuden tasot -rakenne pyrkii siis tehokkaasti erottelemaan erilaisten teorioiden sisällöt, ja sisältää ehdotuksen kontekstilähtöisyydestä fysiikan opetuksen lähestymistapana. Periaatteessa kyse on erityisen vahvasti toteutetusta klassisen ja kvanttifysiikan erottelusta (ks. edellä kappale 5.1 Klassisen fysiikan ja kvanttifysiikan erojen korostaminen).

Gingras (2015) analysoi Einsteinin ajatuksien kehittymistä säteilyn rakenteesta. Analyysin mukaan ajatukset kehittyivät muodollisten analogioiden kautta, joita Einstein käytti ikään kuin linsseinä, joiden läpi hän kykeni katselemaan mustan laatikon kautta Plankin mustan kappaleen säteilyä koskevassa laissa. Tutkimuksessaan Gingras (2015) haluaa osoittaa, kuinka erilaisten fysikaalisten systeemien välillä olevilla formaaleilla analogioilla on tärkeä rooli fysiikan käsitteistön työstämisessä. Tällaiset ajatuskokeet tarjoavat yllättävän paljon luovaa voimaa fysiikan ymmärryksen lisäämisen apukeinoina, ja niitä voidaan käyttää myös fysiikan opetuksessa. (Gingras 2015.)

Ajatuskokeiden ja luonnontieteen filosofian myötä avautuu luonteva mahdollisuus yhdistää lukion fysiikan ja filosofian opetusta.

5.4 Luonnontieteiden historian näkökulma

Tukeutuminen historiaan fysiikan opetuksessa on eräänlaisella tavalla jopa sisäänrakennettuna fysiikkaan oppiaineena ja tieteenalana. Fysiikan kehitys pohjautuu sellaiseen tietoon, joka käsittelee ihmiskunnan historiaa eri tasoilla, erityisesti teknologisen kehityksen saavutukset ovat muodostuneet monesti fysiikan kehityskulkujen varassa. Tietyllä tavalla osa fysiikan sisältöä oppiaineena onkin luonnontieteiden historian oppiminen.

Bungum, Henriksen, Angell, Tellefsen ja Bøe (2015) kirjoittavat ReleQuant-projektista, jossa haluttiin parantaa opetusta ja oppimista kvanttifysiikassa ja suhteellisuusteoriasta norjalaisissa lukioissa. ReleQuant haluttiin rakentaa ja suunnitella mm. seuraavien periaatteiden varaan:

- 1) klassisen ja kvanttifysiikan ristiriitaisuuksien selkiyttäminen
- 2) simulaatioiden käyttö ilmiöiden, joita ei voi kokea suoraan, havainnollistamiseen
- 3) antaa oppilaille mahdollisuus käyttää sekä kirjallista että suullista kommunikaatiota
- 4) keskustellaan aalto-hiukkasdualismista ja epätarkkuusperiaatteesta
- 5) käytetään esimerkkejä käsitteellisestä kehityksestä fysiikan historiasta

- 6) näyttää esimerkkejä siitä, kuinka sen aikaiset fyysikot ovat eri mieltä kvanttifysiikan tulkinnasta ja
- 7) esitellä teknisiä sovelluksia. (Bungum ym. 2015.)

ReleQuant-projektin tavoitelistan kohdat 5 ja 6 muodostavat esimerkin siitä, miten historian oppiminen voidaan yhdistää fysiikan opetussisältöön. Fysiikan käsitteellisen kehityksen peilaaminen ihmiskunnan historiaan (esimerkiksi havaintolaitteiden kehityksestä kertominen, yhteiskunnallisen tilanteen peilaaminen tieteenharjoittamisen mahdollisuuksiin yhteiskunnassa, ja niin edelleen) tarjoaa viitekehyksen fysiikan opettamiselle. Tärkeää olisi myös tuoda esiin, miten tieteen kehitykseen kuuluu tulkintojen moninaisuus ja käsitysten monipuolisuus, ja miten tieteenala kehittyy historian eri vaiheissa omaksuttujen käsitysten hylkäämisten ja uusien käsitysten löytämisen kautta.

Historian tarkasteleminen voi antaa opiskelijalle myös valmiuksia oman identiteetin rakentamiselle sekä antaa aineksia yhteiskunnallisen osaamisen rakentamiselle. Historian ymmärtämisellä on myös merkitystä opiskelijan kulttuuriosaamisen muodostumisessa ja osaamisalueen vahvistamisessa.

5.5 Tarinankerronta ja popularisoidut tiedeartikkelit

Opetuksen muotona kertova ja selittävä opetus on hyvin perinteinen tapa opettaa, mutta tarinoiden kertomisen kautta tämä perinteinen opetustapa saa lisää elävyyttä.

Hansson, Arvidsson, Heering ja Pendrill (2019) ovat tutkimuksessaan keskittyneet tarinankerronnan näkökulmaan fysiikan opetuksessa. Heidän käyttämässään esimerkkitarinassa kerrotaan Ernest Rutherfordista ja hänen työstään. Tutkimuksessa tutkittiin Nature of Science -näkökohtien ilmaantumista opetuskeskustelussa tarinankerronnan jälkeen. Tutkimuksessa tunnistettiin, että monet erilaiset NOS-aspektit esiintyivät keskustelussa. Näitä ovat mm. tieteellisten mallien kokeellinen luonne, tieteellisen ajattelun empiiriset aspektit ja ihmiskeskeiset aspektit tieteessä. Nämä näkökohdat nousevat esiin Rutherfordin ja hänen atomimallinsa tarinassa. (Hansson ym. 2019.)

Rutherfordin ja hänen atomimallinsa lisäksi tarinankerronnan työmenetelmää on tutkittu myös valosähköisen ilmiön tapauksessa. Klassen (2011) on havainnut, että valosähköinen ilmiö on yleisesti käytössä eräänlaisena esittelyaiheena, kun kvanttimekaniikan opintojaksoa ollaan aloittamassa. Klassen (2011) kuitenkin huomauttaa, että kirjallisuuskatsauksen perusteella oppikirjoissa esiintyy historiallisen tulkinnan epätarkkuuksien lisäksi vääriä tulkintoja muun muassa fotonin käsitteestä. Klassen (2011) esittelee tarinan muodossa viisi keskeistä episodista valosähköisen ilmiön historiasta. Näiden viiden episodin avulla voidaan luoda tarkka ja riittävä kuva valosähköisestä ilmiöstä. Klassen (2011) ehdottaa tarinaa ”Fotonin käsitteen syntymä” (The Birth of the Photon Concept) keskeiseksi kokonaisuuden rakenneosaksi, kun kehitetään tarkoituksenmukaista opetusmateriaalia liittyen valosähköiseen ilmiöön.

Tieteen historiaa ja historiallista kehitystä painottava kertomuksellinen lähestymistapa moderniin fysiikkaan avaa mahdollisuuksia integroida fysiikan opetukseen myös historiaa ja yhteiskuntaoppia.

Héraud, Lautesse, Ferlin ja Chabot (2017) laajentavat tutkimuksessaan aikaisempia epistemologisia oletuksia kvanttifysiikan opettamisesta lukiossa Ranskassa. Ongelmallisia viittauksia kvanttiteorian käsitteisiin pohditaan ontologisella tasolla ja intuitionvastaista kvanttiolioiden luonnetta hahmottaen. Héraud ym. (2017) huomioivatkin kertomuksia hyödyntävän lähestymistavan, jonka avulla voidaan kuvata mahdollisia vaihtoehtoisia todellisuuksia asian havainnollistamiseksi. Näissä todellisuuksissa on voimassa vastaavia lakeja kuin oikeassa maailmassa, mutta ne eroavat oleellisilla tavoilla todellisuutta koskevista luonnonlaeista. Vaihtoehtoisten lakien mukaan voidaan materialisoida sellaisia ominaisuuksia, jotka eivät normaalisti olisi havaittavissa jokapäiväisessä kokemusmaailmassa. Fiktiohistorioissa tehdään tällä tavalla ontologisia ehdotuksia luontoa, maailmankaikkeuden rakennetta sekä sen elementtejä koskien. Héraud ym. (2017) yhdistävät fiktiivisiä ja tieteellisiä diskursseja D. Lewisin teoriasta koskien todellisuudenvastaista (eng. counterfactual) logiikkaa ja G. Gamowin kertomuksia mahdollisista vaihtoehtoisista maailmoista.

Héraud ym. (2017) näkevät että fiktiiviset tarinat voivat rikastaa oppilaiden reflektioita maailmasta tieteellistä tietoa koskien. Tällainen monipuolinen perspektiivi, jossa yhdistyy fiktio ja tieteen filosofia, saattaa muodostaa pohjan oppilaiden kehitykselle

kansalaisiksi, jotka ymmärtävät ja tuntevat nykyaikaista fysiikkaa ja sen teknologisia ja sosiaalisia sovelluksia. (Héraud ym. 2017.)

5.6 Tietokonesimulaatiot

Cheong ja Song (2014) ovat koonneet tutkimuksessaan eri tutkimuksissa kehitettyjä ratkaisuja oppilaiden ongelmiin. Monissa tutkimuksissa on muodostettu interaktiivisia tietokonesimulointeja, jotka korostavat visualisoinnin merkitystä kvanttiteorian opetuksessa. Osa tutkimuksista puoltaa luonnontieteen historian käyttämistä opetuksessa, mutta useissa tutkimuksissa todetaan, että myös käsitteellinen ymmärtäminen ja kvanttiteorian tulkinta voidaan ottaa mukaan opetusohjelmaan, kvanttiteorian laskennallisen aspektin sijaan. (Cheong & Song 2014.)

Henriksen ym. (2014) esittelevät ReleQuant-projektin, jonka osana on kehitetty web-pohjaiset opetusmoduulit kvanttifysiikan ja suhteellisuusteorian opetukseen lukiotasolla. Moduulien sisältöjä ovat mm. yleinen suhteellisuusteoria, fotonit ja modernin fysiikan epistemologiset seuraukset. Metodeina ReleQuant -projektissa on käytetty muun muassa kirjallisia ja suullisia tehtäviä sekä yhteistoiminnallisia tutkimuksia animaatioiden ja simulaatioiden pohjalta. Henriksen ym. (2004) haluavat ReleQuant -projektin myötä osoittaa, että opiskelijoiden motivaatiota ja oppimista voidaan tukea huolella suunniteltujen oppimistoimintojen kautta. Näihin oppimistoimintoihin sisältyy keskusteluja, kirjallisia tehtäviä, visualisointeja ja simulaatioita, jotka eivät vain tue käsitteellistä oppimista, vaan auttavat myös reflektoimaan opittua filosofisella ja epistemologisella tasolla. (Henriksen ym. 2014.)

Ayene ym. (2011) ehdottavat ratkaisuksi simulaatioiden, visuaalisuuden ja kokeellisuuden tuomista opetukseen. Epätarkkuusperiaatteen tai aaltohiukkasdualismin ei pitäisi jäädä vain teoreettisiksi ideoiksi, vaan niiden opetus tulisi kytkeä kokeellisuuteen tai visualisointeihin, sekä aktivoida opiskelijat keskustelemaan aiheista. (Ayene ym. 2011.)

Simulaatioiden käyttäminen opetuksessa voi tukea opiskelijaa omaksumaan lukion laaja-alaisia tavoitteita etenkin globaalin ja kulttuuriosaamisen suunnassa, missä yhteydessä tärkeänä pidetään eettistä toimijuutta globaalissa teknologiaympäristössä.

5.7 Keskustelut ja selittäminen vertaisille

Bungum, Bøe ja Henriksen (2018) tutkivat toisen asteen opiskelijoiden pienryhmäkeskusteluita ja niiden potentiaalia auttaa oppilaita ymmärtämään kvanttifysiikkaa paremmin. He käyttivät aineistonaan 96 pienryhmäkeskustelua, jotka käsittelivät kahta perustavanlaatuista kvanttifysiikan ongelmaa: voiko valo olla sekä aaltoja ja hiukkasia, ja voiko Schrödingerin ajatuskokeen kissa olla samanaikaisesti sekä kuollut että elävä. He luokittelivat keskustelut kategorioihin, ja pystyivät pääättelemään, että 70 % keskusteluista olivat tuloksellisia siinä mielessä, että ne edesauttoivat oppilaiden ymmärrystä kvanttifysiikasta. Potentiaalinen hyöty voitiin todeta siten, että oppilaat saavat mahdollisuuden

- i) artikuloida käsitteellisiä vaikeuksia,
- ii) syventää ymmärrystä näkökulmien vaihdon yhteydessä ja
- iii) muodostaa uusia kysymyksiä. (Bungum ym. 2018.)

Keskustelut ja selittäminen vertaisille on lukion laaja-alaisen tavoitteiden mukaista vuorovaikutusosaamista kehittävää toimintaa. Opiskelijan sosiaaliset taidot, yhteistyökyky ja yhdessä oppimisen taidot kehittyvät vertaiskeskusteluita suosivassa opetustavassa. Yhteistyö ja toisten auttaminen edesauttavat myös rakentavan viestinnän taitojen kehittymistä.

5.8 Erityiset lähestymistavat: kvanttitila, kvanttoni ja Diracin muotoilu

Monet tutkijat ovat kehittäneet myös erityisiä sisältöspesifejä lähestymistapoja kvanttifysiikan opettamista silmällä pitäen. Greca ja Freire (2003) toteavatkin, että kvanttifysiikan opettamisessa on muiden opetusta koskevien valintojen (esimerkiksi menetelmän didaktisen lähestymistavan valitsemisen) lisäksi tehtävä myös epistemologinen valinta, joka koskee kvanttiteorian tulkintaa.

Greca ja Freire (2003) tekivät opetuskokeilun, jossa kvanttiteoria esiteltiin ilman klassisia analogioita. Opetuskokeilussa käytettiin kvanttitalan käsitettä kvanttiteorian avainkäsitteenä ilmentämään systeemin fysikaalista todellisuutta erillisenä mittausprosessista. Heidän tutkimuksessaan insinööriopiskelijoiden parissa todettiin,

että opiskelijat saavuttivat kohtuullisen perusymmärryksen kvanttimekaniikan perusteista tämän lähestymistavan avulla. Lisäksi suuri osa opiskelijoista oli pitänyt opetuksesta ja oli kiinnostunut oppimaan lisää kvanttimekaniikasta. (Greca & Freire 2003.)

Lautesse, Vila Valls, Ferlin, Héraud ja Chabot (2015) puolestaan tutkivat ranskalaisessa lukiokoulutuksessa kahden erilaisen lähestymistavan vaikutusta kvanttifysiikan opettamiseen oppikirjoja materiaalinaan käyttäen. He käyttävät näistä erilaisista lähestymistavoista nimityksiä konservatiivinen lähestymistapa ja innovatiivinen lähestymistapa. Konservatiivisella lähestymistavalla he viittaavat tässä yhteydessä kvanttifysiikan opettamiseen lähellä Kööpenhaminalaisen koulukunnan käsitystä kvanttimekaniikan luonteesta, ja innovatiivisella lähestymistavalla viitataan kvanttoni-käsitteen (eng. quanton) kautta tapahtuvaan teorian läpikäyntiin. He pohtivat erityisesti, helpottaako kvanttoni-käsitteen ja siihen liittyvän sanaston käyttö oppilaiden ymmärrystä kvanttifysiikkaan liittyen. (Lautesse ym. 2015.) Konservatiivisen lähestymistavan etuna Lautesse ym. (2015) pitää sitä, että klassisen fysiikan ja kvanttifysiikan välille voidaan muodostaa jatkumo.

Michelini, Ragazzon, Santi ja Stefanel (2000) taas ehdottavat mahdolliseksi lähestymistavaksi kvanttifysiikan perusaiheisiin niin sanottua Diracin muotoilua, jossa ei tarvita edistynyttä matemaattista muotoilua tai fysiikan taustatietoja. Lähestymistavassa ideana on yleistää yksinkertaisen kahden tilan systeemin kuvailu, erityisesti fotonien lineaarinen polarisaatio niiden vuorovaikutuksessa polaroidien ja kahtaistaittavien kristallien kanssa. Fysikaalisten suureiden havainnointi yhdistetään lineaarioperaattoreihin ja asiasta keskustellaan sekä käsitteellisellä että muodollisella tasolla. Michelini ym. (2000) myös testasivat ajatustaan lukion opiskelijoilla, ja tulokset tukivat väitettä lähestymistavan hyödyistä.

Michelini ym. (2000) perustelevat lähestymistapaa mm. kahdesta syystä. Ensinnäkin, superpositioperiaate on kvanttimekaniikan perusperiaate, ja Diracin muotoilu korostaa sen roolia. Myös vektoritilojen ja lineaarioperaattorien muodostama matemaattinen formalismi tarjoaa yhtenäisen kuvan mikroskooppisista ilmiöistä, aina yksinkertaisimmasta spin- systeemistä hienostuneempiin kvanttikenttiin asti. Diracin muotoilu vaikuttaa heistä parhaalta tavalta tutustuttaa opiskelijat kvanttimekaaniseen ajatusmaailmaan. (Michelini ym. 2000.)

Kvanttitila-lähtökohdan, kvanttoni-käsitteen ja Diracin muotoilun opetuskäytön voidaan nähdä tukevan monitieteisen ja luovan osaamisen tavoitetta, koska niiden kautta asioita yhdistellään uudenvälisillä tavoilla.

5.9 Ekskursiot ja teknologia

Wiener, Woithe, Brown ja Jende (2016) ovat tarjonneet tutkimusartikkelissaan tietoa Cernissa toimivasta LHC-hiukkaskiihdyttimestä lukio- ja yläkouluopetuksen tarpeisiin. Artikkelissa on muodostettu yleiskuva LHC:n toiminnasta ja kerätty yhteen resursseja, joista voisi olla hyötyä opetuksessa. Vahvistaakseen oppilaiden kiinnostusta korkeaenergiseen fysiikkaan, he esittelevät artikkelissaan myös tuoreehkon ongelman, jota LHC:n operaattorit joutuvat työssään ratkomaan. He myös muistuttavat monista opetusohjelmista, joissa on esitelty LHC:n toimintaa luokkahuoneeseen sopivilla tavoilla. (Wiener ym. 2016.)

Teknologiaa voi hyödyntää opetuksessa myös tarjoamalla opettajille mahdollisuuksia järjestää opetusta vaihtoehtoisella tavalla teknologian tarjoamia ratkaisuja hyväksikäyttäen. Binek, Kimla ja Jarosz (2017) toteuttivat tutkimuksen henkilökohtaisen palautesysteemin käytöstä opetuksessa. He käyttivät klikkereitä, joissa opetusryhmältä voitiin kysyä kysymyksiä ja saada heti vastaukset kaikilta oppilailta yhtä aikaa opetuksen lomassa. Binek ym. (2017) toteavat metodin olevan todella tehokas ja erityisesti opiskelijoiden kyky omaksua tietoa parani klikkereiden käytön seurauksena. Opiskelijatkin pitivät metodista, koska he oppivat enemmän ja myös opettajat pystyivät parantamaan omia opetusmetodejaan klikkereiden käytön myötä. Klikkereitä on helppo käyttää, mutta hyvien kysymyksien kysyminen voi olla joskus vaikeaa. Kysymyksen täytyy nostaa oppilaiden keskittymisen tasoa ja osallistumisen tasoa, ja sen tulisi sisältää myös mahdollisuus vääränlaiseen päättelyketjuun. (Binek ym. 2017.)

Teknologisten valmiuksien kehittäminen tukee lukion laaja-alaisen tavoitteiden saavuttamista etenkin globaalien ja kulttuuriosaamisen suunnassa, missä tärkeänä nähdään eettinen toimijuus globaalissa teknologiaympäristössä. Lisäksi opetussuunnitelman perusteissa esitetyt korkeakoulu- ja työelämäyhteistyön tavoitteet konkretisoituvat, kun fysiikan sovelluksia esitellään vierailuilla eri paikkoihin.

6 Tulosten tarkastelua ja pohdintaa

Tutkimuskirjallisuuden perusteella on luontevaa todeta, että modernin fysiikan käsitteellinen hallinta on opiskelijoille haastavaa vielä yliopistotasollakin. Käsitteiden syvälinen hallinta on vaikeaa, vaikka opiskelijat olisivat opiskelleet fysiikkaa pitkälle. Opetuksen järjestämisen yhteydessä voidaan syystäkin miettiä, pitäisikö fysiikkaa lukiossa opiskelevien nuorten edes kyetä omaksumaan fysiikkaa käsitteellisesti korkeammalla tasolla tai saavuttaa syvällistä ymmärrystä hankalasta aihepiiristä. Opetuksen tavoitteeksi voitaisiin esimerkiksi päättää, että lukiotasolla keskitytään vaikkapa uuden sanaston hallintaan tai kaavojen soveltamiseen mekaanisena laskutoimituksena. Aihepiiriin voitaisiin tutustua ilman vaatimusta ymmärtää asioita käsitteellisesti syvälinen tasolla. Tämän jälkeen odotettaisiin, että jos oppilaat innostuvat jatkamaan opintojaan, he voisivat opiskella kvanttifysiikkaa syvälinen opintojensa myöhemmässä vaiheessa.

Lukiossa moderni fysiikka voisi olla sellainen mauste, joka johdattelee oppilaita tutkimaan ja opiskelemaan asioita lisää. Opintojen tarkoituksena voisi olla innostaa ja rohkaista opiskelijoita opiskelemaan fysiikkaa pidemmälle. Fysiikan teoriat eivät aina ole helppoja ymmärtää, koska formaalin muotoilun ja matematiikan taitojen on myös kehityttävä samalla, kun fysiikan käsitteellistä hallintaa syvennetään.

Toisaalta, kuten opetuskokeilujen tulokset osoittavat, erilaiset opetusmenetelmät voivat parantaa oppilaiden sisällön hallintaa käsitteellisen tasolla. Esimerkiksi tarinallisuus (Hansson ym. 2019) ja pienryhmäkeskustelut (Bungum ym. 2018) ovat tutkimuksissa tuoneet lupaavia tuloksia siitä, että opiskelijoiden käsitteiden hallinta saa tukea tämänkaltaisista toisenlaisista opetusmuodoista.

Nykyään yhtenä tiedeopetuksen tavoitteena voidaan nähdä myös niin sanotun tieteellisen tiedon lukukyvyn kehittäminen. Pisa-mittauksissa saadaan käsitys siitä, miten oppilaat pärjäävät tieteellistä lukutaitoa mittaavissa testeissä. Internetin myötä tiedon tavoitettavuus on parantunut huomattavasti, mutta samalla myös ristiriitainen tieto leviää. Kansalaisen tulisi hallita edistyneempiä menetelmiä arvioida tiedon todenmukaisuutta ja merkitystä kuin aiemmin. Suurempi osa väestöstä menee opiskelemaan korkeakouluihin, ja yhteiskunnan tarjoamat työtehtävät muuttuvat sellaisiksi, joissa olennaista on osata hyvin tieteellisen tiedon perusteiden arviointi.

Tietoa arvioitaessa on kyettävä lähdekriittisyyteen ja pystyttävä arvioimaan, minkä tietolähteen varaan muodostaa käsityksensä. Koululaitoksella ei ole enää sellaista yksinoikeutta tiedon jakamiseen, mikä aiemmin muodosti keskeisen merkityksen koulujen toiminnalle. Opettajan roolissa varsinaisen tiedon jakamisen ohessa tärkeäksi muodostuu sen opettaminen, miten tietoa voidaan arvioida esimerkiksi luotettavuuden kannalta. Fysiikan opetuksen tärkein merkitys saattaa nyt ja tulevaisuudessa olla fysiikan ja luonnontieteiden menetelmän opiskelu. Luonnontieteellinen menetelmä rohkaisee elämäntaitojenkin kannalta tarpeelliseen kriittisyyteen, ja kokeelliset menetelmät muodostavat joka tapauksessa koulufysiikassa keskeisen osa-alueen.

Modernin fysiikan sisältöjen osalta kokeellisuus saattaa kärsiä jonkin verran, koska modernin fysiikan kokeet eivät resursoinnin osalta ole helposti kouluympäristöön tuotavissa. Modernin fysiikan kokeita voidaan toki selittää opettajajohtoisesti, mutta oppilaan aktiivisuus muuttuu tiedon luomisprosessissa, kun hän ei ole aktiivinen osapuoli fysikaalisen kokeen toteutuksessa. Kertomuksien ja ajatusleikkien avulla voidaan tuoda modernin fysiikan käsitteistöä kokeiden toteutukseen. Kuitenkin kokeellisuuden osalta modernin fysiikan perusteiden opetus on haaste kouluissa tapahtuvalle opetukselle.

Koulufysiikan modernisointipyrkimyksiä vaikeuttaa opetukseen käytettävissä oleva rajallinen aika ja käsitteellisesti hierarkkisen tieteenalan muoto. Olisi epärealistista olettaa oppilaiden omaksuvan sellaisia teorioita, joihin heillä ei ole vaadittavia pohjatietoja. Lisäksi, yleissivistävän koulutuksen järjestämisessä on syytä pohtia koko yleissivistyksen käsitettä. Opetuksen järjestäjän on kyettävä päättämään, mikä kuuluu kouluopetuksen kattamaan yleissivistykseen. Kouluopetuksen järjestämisessä otetaan kantaa esimerkiksi siihen, kuuluuko suhteellisuusteorian tunteminen yleissivistykseen ja voidaanko suhteellisuusteoriaa toisaalta edes opettaa siinä muodossa kuin Einstein on sen aikanaan muotoillut. Mahdollisesti suhteellisuusteorian matemaattista muotoilua pitäisi keventää, ja silloin tulisi pohtia yksinkertaistuuko ymmärtäminen, kun opetuksessa joudutaan ottamaan huomioon, että oppilaiden enemmistöllä ei voi edes teoriassa olla tarvittavia pohjatietoja aiheen omaksumiseen. Opetuksen järjestävän tahon pitäisi miettiä, vahingoitetaanko oppilaiden kykyä sisäistää asia jatkossa, jos muodostetaan opetuksen kannalta helpompia puolitotuuksia.

Ei ole helppoa määritellä, missä piilee nykyaikana yleissivistyksen rajat, ja kuinka syvällisesti opiskelijan olisi ymmärrettävä asioita. Pinnallisempi osaaminenkin saattaa riittää maailmassa, jossa asiat voi tarkistaa nopeasti, ja yksityiskohtia ei tarvitse näin ollen pitää mielessään. Voidaan olla huolissaan kaikkien tiedon pinnallistumisen ongelmasta. Ehkä ongelma liittyy enemmän rajalliseen keskittymiskykyyn. Etenkin aivotutkijat ovat huolissaan siitä, ettei syvälliselle oppimiselle jää aikaa keskeytysten täyttämässä maailmassa. Fysiikan teoriat antavat opiskelijoille mahdollisuuden sen oppimiseen, että asiasisällöt eivät rakennu vain erillisistä osatiedoista, vaan tiedon syvällistä omaksumista varten on ymmärrettävä paljon asioita, ja osattava yhdistää tietoja loogisella tavalla.

Uusi opetussuunnitelma mahdollistaa oppiainerajat ylittävän opetuksen, eikä modernin fysiikan moduulia ole pakko opettaa itsenäisenä kokonaisuutena, vaan opinnot voidaan kytkeä myös muiden oppiaineiden opetukseen. Perinteisesti muita fysiikalle läheisiä oppiaineita ovat olleet matematiikka ja kemia, ja fysiikan opetuksessa hyödynnetään usein myös historiaa ja tietotekniikkaa.

Historiallisella lähestymistavalla on fysiikan opetuksessa etunsa tavoiteltaessa laajempaa kulttuurista ymmärrystä fysiikan merkityksestä ja asemasta, mutta on syytä miettiä, miten se tukee fysiikan käsitteellisen sisällön oppimista ja opetusta. Fysiikan käsitteellisen asiasisällön kannalta fysiikan historia ei kuitenkaan ole fysikaalisen oppiaineen keskiössä, vaan ne ajatukset ja teoriat ja havainnot, joita tieteen historiassa on tehty. Tämän vuoksi olisi perusteltua luopua sellaisista historiallisista opetusrakennelmista, jotka tutkitusti voivat heikentää oppilaiden tiedon omaksumisen astetta. Klassinen esimerkki tästä on Bohrin atomimalli, joka graafisuudessaan on niin yliyksinkertaistettu, että aiheuttaa häiriötä, kun koitetaan omaksua uudempaa tieteellistä näkökulmaa aineen rakenteeseen. Ainakin opetuksessa on syytä korostaa tuon mallin historiallisuutta.

Opetussuunnitelman perusteiden mukaan (Opetushallitus 2019, 25) opetus on järjestettävä niin, että opiskelijalla on mahdollisuus saada tietoa työelämän tarjoamista mahdollisuuksista ja kehityssuunnista oman tulevaisuuden ja jatko-opintojen suunnittelemista varten. Tavoitteena on, että oppilaalle tulisi tarjota oppimiskokemuksia, jotka rohkaisevat aloitteellisuuteen, ennakkoluulottomuuteen, yrittäjämäiseen toimintaan, vastuullisuuteen yhteistyöhön ja rakentavaan

ongelmanratkaisuun. Laaja-alaiseen osaamiseen liittyen työelämävalmiuksien kehittämisessä painottuvat vuorovaikutusosaaminen, monitieteinen ja luova osaaminen, yhteiskunnallinen osaaminen sekä eettisyys ja ympäristöosaaminen.

Siksi voisi olla perusteltua etsiä mahdollisuuksia, miten fysiikkaa voisi opettaa jo lukiossa ammatinvalinnan näkökulmasta. Esimerkiksi kosmologiaa voitaisiin kokeilla opettaa kosmologille tyypillisen työpäivän kautta. Opiskelijat eläytyisivät kosmologin rooliin, ja rooliopetuksen kautta opiskelijoille esiteltäisiin, millaisia työtehtäviä kosmologi kohtaa päivän aikana, millaisia työtapoja ja työvälineitä kosmologilla on ja miten hän kehittää työssään maailmankaikkeuden syntyä koskevia teorioita. Esimerkkejä tietenkin yksinkertaistettaisiin tarpeellisella tavalla, mutta tällaisen lähestymistavan kautta voitaisiin vahvistaa opiskelijoiden ymmärrystä eri ammattien sisällöistä.

Opetussuunnitelmatyössä olisi syytä painottaa tutkimuspohjaista tietoa siitä, miten fysiikkaa opitaan ja miten sitä kannattaisi opettaa. Kvanttifysiikan erilainen paradigma tuottaa tutkitusti opiskelijoille hankaluuksia asian omaksumisessa, ja nämä hankaluudet tulisi ottaa huomioon opetuksessa. Erityisesti opiskelijoita tulisi kannustaa itse sanallistamaan opetuksen esiin nostamia uusia ajatuksia, ja tekemään tietoisesti ero klassisen fysiikan ja kvanttifysiikan paradigman välillä. Myös mahdollisuuksien mukaan toteutettava sensomotorista aktivaatiota tukeva kokeellisuus voi auttaa opiskelijoita omaksumaan syvällisemmin kvanttifysiikan ajatuksia.

7 Johtopäätökset ja suositukset

Tutkielman tavoitteena oli etsiä keinoja, joilla modernia kvantti- ja hiukkasfysiikkaa kannattaisi fysiikan opetuksesta tehdyn tutkimuksen valossa opettaa linjassa lukion uusien opetussuunnitelman perusteiden kanssa. Johtopäätöksinä voidaan mainita, että opetuksen tutkimusta aiheesta oli löydettävissä kohtuullisen paljon, ja tutkimustulosten mukaan on rohkaistavaa ja mahdollista opettaa kvanttifysiikkaa jo lukiossa. Monissa artikkeleissa on todettu, että kvanttifysiikan ideoiden opettaminen on mahdollista myös ilman pitkälle menevää matemaattista formalismia, ja lisäksi oppilaiden mielestä on kiinnostavaa opiskella modernin fysiikan sisältöjä.

Yleissivistyksen kannalta tärkeimpinä pidettäviä fysiikan asiasisältöjä voi olla vaikea tunnistaa, sekä päättää niiden olevan valtakunnallisissa opetussuunnitelman perusteissa tietynsisältöiset. Ylipäättään nykyisessä informaationkyllästyvässä maailmassa oleellisuuden tiedon opettaminen on haastavaa. Opetuksen tehokkaan toteutuksen kannalta on ymmärrettävä syvällisesti oppiaineen rakenne, jotta opettajalla on tarvittava valmius siirtää eteenpäin sellaiset taidot ja antaa oppilaille mahdollisuudet omaksua ne tiedot, jotka erityisesti ovat tärkeitä tieteenalan kehityksen kannalta.

Uudet lukion opetussuunnitelman perusteet antavat vahvasti tietynlaisen arvopohjan, jonka varaan oppilaitosten opetuksen järjestäjän roolissa ja opettajan virkavelvollisuutensa nojalla on pystyttävä rakentamaan opetuksensa pohja ja runko. Fysiikka oppiaineena noudattelee niitä historiallisia perinteitä, joita sille on ajan mittaan säilyttynyt oppilaitoksissa tapahtuvan opetuksen myötä. Kuitenkin oppiaineen sisällä odotetaan tapahtuvan jatkuvaa muutosta ja kehitystä. Uudistuvat opetussuunnitelmien tavoitteet antavat fysiikalle oppiaineena erilaisia opetuksellisia tehtäviä, joiden avulla opetus nykyaikaistuu ja siirtyy vastaamaan tämän päivän tiedeopetukselle määritettyjä tavoitteita. Tämän vuoksi on kyettävä unohtamaan sopivalla tavalla vanhat tavat, tai ainakin kyseenalaistamaan ne.

Fysiikan arvostus oppiaineena lukiossa on yleisesti ottaen hyvä, jopa uudessa korkeakoulujen todistusvalinnassa nimenomaan fysiikan osaamisesta annetaan hyviä lähtöpisteitä monille eri opiskelualueille. Fysiikalla on siis ainakin välinearvoa opiskelijoille, koska sen osaamisesta saavuttaa hyvät pohjapisteet jatkokoulutukseen hakeutuessa.

Tutkittavaksi jatkossa jääkin, kuinka hyvin opetussuunnitelmien uudistuksen jälkeen opitaan fysiikkaa. Tutkielmassa tunnistettiin muutamia opetussuunnitelman perusteiden tasolla esiintyviä uudistuksia modernin fysiikan opetuksessa, ja onkin mielenkiintoista jatkossa tutkitun tiedon kautta saada mahdollisesti selvityksiä siitä, ovatko uudet pakolliset sisällöt parantaneet opiskelijoiden osaamista, vai onko lukion opetussuunnitelma fysiikan osalta jo liian täynnä opiskeltavaa sisältöä. Asiapohjaa saattaa olla pikemminkin tarvetta karsia opetussuunnitelman perusteiden tasolla, jotta opiskelijoille jäisi enemmän aikaa omaksua kvanttifysiikan ajatustason erilaisuus klassiseen fysiikkaan verrattuna.

Jatkopohdinnan varaan jää tämän katsauksen jälkeen myös mielenkiintoinen kysymys, voitaisiinko modernia fysiikkaa lisätä oleellisesti myös fysiikan pakolliseen oppiaineeseen. Valtakunnallisesti pakollisia fysiikan opintopisteitä on 2019 julkaistuissa opetussuunnitelman perusteissa määritetty 2 opintopistettä. Toinen niistä opiskellaan teemalla fysiikka luonnontieteenä, ja opintomoduulissa keskitytään fysiikan kokeelliseen luonteeseen ja kvantitatiiviseen mallintamiseen. Toisen opintopisteen teemana on fysiikka, ympäristö ja yhteiskunta, ja moduulissa keskitytään energian tuotantoon ja siirtoon, sekä tuotantoprosessiin vaikutuksiin ympäristöön ja yhteiskuntaan. Toisaalta myös aine, energia, ja säteily linkittyvät toisiinsa, joten energiakeskustelun näkökulmasta voitaisiin keskustella myös modernimmasta fysiikasta, ja ottaa modernin fysiikan käsitteitä mukaan pakolliselle kurssille lisäämään mielenkiintoa opetukseen.

Eräänä jatkokehittelyn mahdollisuutena voisi kokeilla myös opinto-ohjauksen yhdistämistä fysiikkaan perinteisempien kemian, historian ja filosofian lisäksi. Yleisesti lukio-opetuksen tavoitteena on muun muassa työelämätaitojen korostaminen opetuksessa, laajasti sivistyneen ihmisen ideaali ja oppilaiden entistä kattavampi opinto-ohjaus (muun muassa jälkiohjaus vuoden ajan valmistumisen jälkeen). Opettaja-lehdessä on käsitelty nyt käynnissä olevaa paikallista opetussuunnitelmien suunnittelutyötä (Hongisto 2019). Artikkelissa kerrotaan, että uudet lukion opetussuunnitelman perusteet velvoittavat myös aineenopettajia osallistumaan enemmän opintojen ohjaukseen. Esimerkkinä mainitussa koulussa kerrotaan, että opinto-ohjaajat ovat vierailleet oppitunneilla, ja työelämälähtöisyyttä on toteutettu viemällä lukiolaisia tutustumaan taide- ja tiedealojen työpaikoille.

Työelämälähtöisellä näkökulmalla voitaisiin pyrkiä nostattamaan lukiolaisten intoa valita myös myöhempiä fysiikan kursseja. Opetuksen kautta voisi selventää työelämässä esiintyvien konkreettisten esimerkkien valossa sitä, miten monissa eri tilanteissa fysiikan osaamista voi hyödyntää, ja miten monenlaisiin ammatteihin päätymistä fysiikan opiskelu voi edesauttaa. Tietenkin oppilaiden jatko-opintomahdollisuuksiin vaikuttavat monet seikat. Esimerkiksi korkeakoulujen opiskelijavalintojen kriteerit ovat muuttuneet viime aikoina moneen kertaan. Jatkossa korkeakoulujen sisäänottoon vaikuttavat todennäköisesti myös pienentyvien ikäluokkien aiheuttamat vähennykset opiskelijapaikkojen määrään. Ammatinkuvat elävät myös aina jonkinlaisessa murroksessa, kun muun muassa yhteiskunnan organisoituminen ja teknologia muuttavat yhteiskunnassa tehtävän palkkatyön luonnetta.

Suomen korkeakoulutuksen valintaperusteissa on käynnissä siirtymävaihe, jonka myötä opiskelijat valitaan korkeakouluihin ylioppilastodistusten arvosanojen perusteella entistä laajemmassa mittakaavassa. Fysiikan ylioppilaskokeesta saatu arvosana on arvioitu joidenkin alojen todistusvalinnassa lähtöpisteiltään arvokkaammaksi kuin vaikkapa kyseistä ainetta läheisemmän oppiaineen ylioppilaskokeen arvosana. Esimerkiksi historiaa opiskelemaan pyrkivälle on todistusvalinnassa arvokkaampaa saada laudatur arvosanaksi fysiikasta kuin yhteiskuntaopista (Opetushallitus Opintopolku-portaali, 2019). Fysiikan opetuksessa voisi lisätä näkökulmaksi ammattilaisten työssä vaadittavat metataidot (looginen ajattelu, kokeellisuus, ongelmanratkaisu), mitä varmasti on ajateltu todistusvalinnan pisteytysohjeessa. Hyvän fysiikan arvosanan on mahdollisesti ajateltu kuvaavan opiskelijan suoriutumista alalla kuin alalla.

Peruskouluissa on myös alkanut uudistus, jossa arvosanoille asetetaan yhä tarkemmat kriteerit. Mahdollisesti kehityskulku johtaa myös opintosisältöjen tarkentamiseen ja opetuksen yhtenäistämiseen peruskoulutasolla, kun arvioinnista pyritään tekemään yhdenmukaisempaa. Koululaitos on yhä vaikeamman arvioinnin edessä sen suhteen, mitä ja miten oppilaita olisi hyvä opettaa. Yleissivistävän lukion tarkoitus on luoda opiskelijoilleen laaja yleissivistys, vaikka onkin hankalaa määritellä, mikä kaikki informaatiotulvan sävyttämässä maailmassa kuuluu yleissivistykseen. Yhä rohkeampia ratkaisuja on yksittäisenkin opettajan kyettävä tekemään koettaessaan hahmottaa, mikä kaikki on sellaista olennaista tietoa, jota opiskelija tarvitsee elämänmittaisella

matkallaan. Tarpeetonta historiallista painolastia on siis kyettävä pudottamaan kouluopetuksesta, ja opetuksen on keskityttävä keskeiseen sisältöön.

Kouluopetuksessa on uskallettava tarttua uusiin tapoihin opettaa modernia fysiikkaa ja kvanttimekaniikkaa. Opetus on voitava aloittaa muistakin tavoista ajatella sisältöjä kuin tiedon kehittymisen kronologinen historia tarjoaa malliksi. Fysiikan opetuksessa on syytä pyrkiä etenemään sitä reittiä, joka on opiskelijan kannalta laadukkain ja tuottaa vähiten sekaannusta ja virheellisiä käsityksiä. Ihanteellisessa tapauksessa sellainen opetus on myös motivoivaa ja innostavaa, ja se tuottaa aitoa oppimisen ja oivaltamisen iloa, sekä oppilaan itsetunnon kasvulle pohjaa rakentavia onnistumisen elämyksiä.

Lähteet

- Ayene, M., Krick, J., Damitie, B., Ingerman, A. & Thacker, B. 2019. A Holistic Picture of Physics Student Conceptions of Energy Quantization, the Photon Concept, and Light Quanta Interference. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 17(6), s. 1049-1070.
- Ayene, M., Krick, J. & Damtie, B. 2011. Wave-particle duality and uncertainty principle: Phenomenographic categories of description of tertiary physics students' depictions. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 7(2).
- Baily, C. & Finkelstein, N.D. 2009. Development of quantum perspectives in modern physics. *Physical Review Special Topics. Physics Education Research*, 5(1), s. 010106.
- Binek, S., Kimla, D. & Jarosz, J. 2017. The influence of the application of personal response systems on the effects of teaching and learning physics at the high school level. *Physics Education*, 52(1), s. 15020.
- Bungum, B., Bøe, M.V. & Henriksen, E.K. 2018. Quantum talk: How small-group discussions may enhance students' understanding in quantum physics. *Science Education*, 102(4), s. 856-877.
- Bungum, B., Henriksen, E.K., Angell, C., Tellefsen, C.W. & Bøe, M.V. 2015. ReleQuant – Improving teaching and learning in quantum physics through educational design research. *Nordic Studies in Science Education*, 11(2), s. 153-168.
- Cheong, Y., Cheong, Y., Song, J. & Song, J. 2014. Different Levels of the Meaning of Wave-Particle Duality and a Suspensive Perspective on the Interpretation of Quantum Theory. *Science & Education*, 23(5), s. 1011-1030.
- Di Sessa, A.A. & Sherin, B.L. 1998. What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20(10), s. 1155-1191.
- Enkvist, K. Musta aukko on älyllisen huvipuiston vuoristorata – se yllättää, pelottaa ja kutkuttaa vatsaa. Viitattu 10.1.2020. <https://yle.fi/uutiset/3-10272048>
- Falk, J. 2007. Students' depictions of quantum mechanics: a contemporary review and some implications for research and teaching. Department of Physics, Uppsala University. Lisensiaatintyö.
- Fischler, H. & Lichtfeldt, M. 1992. Modern physics and students' conceptions. *International Journal of Science Education*, 14(2), s. 181-190.
- Frazer, L. 2017. Diversity in Physics Education Research: A Decade of Inclusion and Future Challenges. E-artikkeli.
- Gingras, Y. 2015. The Creative Power of Formal Analogies in Physics: The Case of Albert Einstein. *Science & Education*, 24(5), s. 529-541.
- Greca, I. & Freire Jr, O. 2003. Does an Emphasis on the Concept of Quantum States Enhance Students' Understanding of Quantum Mechanics? *Science and Education*, 12(5), s. 541-557.
- Hadenfeldt, J.C., Neumann, K., Bernholt, S., Liu, X. & Parchmann, I. 2016. Students' progression in understanding the matter concept. *Journal of Research in Science Teaching*, 53(5), s. 683-708.
- Hadzidaki, P. 2008. The Heisenberg Microscope: A Powerful Instructional Tool for Promoting Meta-Cognitive and Meta-Scientific Thinking on Quantum Mechanics and the Nature of Science. *Science & Education*, 17(6), s. 613-639.

- Hansson, L., Arvidsson, Å., Heering, P. & Pendrill, A. 2019. Rutherford visits middle school: a case study on how teachers direct attention to the nature of science through a storytelling approach. *Physics Education*, 54(4), s. 45002.
- Hansson, L., Leden, L. & Pendrill, A. 2019. Contemporary science as context for teaching nature of science: teachers' development of popular science articles as a teaching resource. *Physics Education*, 54(5), s. 55008.
- Henriksen, E.K., Bungum, B., Angell, C., Tellefsen, C.W., Frågåt, T. & Bøe, M.V. 2014. Relativity, quantum physics and philosophy in the upper secondary curriculum: challenges, opportunities and proposed approaches. *Physics Education*, 49(6), s. 678-684.
- Henriksen, E.K., Angell, C., Vistnes, A.I. & Bungum, B. 2018. What Is Light? *Science & Education*, 27(1-2), s. 81-111.
- Héraud, J., Lautesse, P., Ferlin, F. & Chabot, H. 2017. Representing the Quantum Object Through Fiction in Teaching. *Science & Education*, 26(3-4), s. 299-322.
- Hongisto, S. 2019. Lukiounelma ei rahatta rakennu. *Opettaja-lehti* 5.12.2019.
- Ireson, G. 2000. The quantum understanding of pre-university physics students. *Physics Education*, 35(1), s. 15-21.
- Johnston, I.D., Crawford, K. & Fletcher, P.R. 1998. Student difficulties in learning quantum mechanics. *International journal of science education*, 20(4), s. 427-446.
- Jones, D.G.C. 1991. Teaching modern physics-misconceptions of the photon that can damage understanding. *Physics Education*, 26(2), s. 93-98.
- Juuti, K. & Lavonen, J. 2016. How teaching practices are connected to student intention to enrol in upper secondary school physics courses. *Research in Science & Technological Education*, 34(2), s. 204-218.
- Kaku, M. 1998. Encyclopedia Britannica: Albert Einstein, German-American physicist. Elektroninen tietosanakirja-artikkeli. Viitattu 2.9.2020. <https://www.britannica.com/biography/Albert-Einstein#ref256582>
- Kalkanis, G., Hadzidaki, P. & Stavrou, D. 2003. An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. *Science education*, 87(2), s. 257-280.
- Kanim, S. & Cid, X.C. 2017. The demographics of physics education research. E-artikkeli.
- Karakostas, V. & Hadzidaki, P. 2005. Realism vs. Constructivism in Contemporary Physics: The Impact of the Debate on the Understanding of Quantum Theory and its Instructional Process. *Science & Education*, 14(7), s. 607-629.
- Ke, J., Monk, M. & Duschl, R. 2005. Learning Introductory Quantum Physics: Sensori-motor experiences and mental models. *International Journal of Science Education*, 27(13), s. 1571-1594.
- Klassen, S. 2011. The Photoelectric Effect: Reconstructing the Story for the Physics Classroom. *Science & Education*, 20(7), s. 719-731.
- Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H.J., Brinkman, A. & van Joolingen, W. 2017. Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. *Physical review physics education research*, 13(10109).
- Lautesse, P., Vila Valls, A., Ferlin, F., Héraud, J. & Chabot, H. 2015. Teaching Quantum Physics in Upper Secondary School in France. *Science & Education*, 24(7), s. 937-955.
- Levrini, O. & Fantini, P. 2013. Encountering Productive Forms of Complexity in Learning Modern Physics. *Science & Education*, 22(8), s. 1895-1910.

- Lin, S. & Singh, C. 2010. Categorization of quantum mechanics problems by professors and students. *European Journal of Physics*, 31(1), s. 57-68.
- Margel, H., Eylon, B. & Scherz, Z. 2008. A longitudinal study of junior high school students' conceptions of the structure of materials. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(1), s. 132-152.
- Michellini, M., Ragazzon, R., Santi, L. & Stefanel, A. 2000. Proposal for quantum physics in secondary school. *Physics Education*, 35(6), s. 406-410.
- Mutanen, A. Koulun fysiikka jumiutui sadan vuoden taakse. Viitattu 10.1.2020 https://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/koulun_fysiikka_jumiutui_sadan_vuoden_taakse_31402
- Olsen, R.V. 2002. Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. *International journal of science education*, 24(6), s. 565-574.
- Opetushallitus. 2019. Lukion opetussuunnitelman perusteet 2019. Määräys OPH-2263-2019.
- Opetushallitus, Opintopolku-portaali. 2019. Yliopistojen todistusvalinnan pisteytykset. Viitattu 15.12.2019 <https://opintopolku.fi/wp/opo/korkeakoulujen-haku/mika-korkeakoulujen-opiskelijavalinnoissa-muuttuu-vuoteen-2020-menessa/yliopistojen-todistusvalinnat-2020/#filhisteo>
- Pereira, J.A.M. 2019. Introducing dark energy in the classroom using paradoxes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1286, s. 12008.
- Petri, J. & Niedderer, H. 1998. A learning pathway in high-school level quantum atomic physics. *International journal of science education*, 20(9), s. 1075-1088.
- Räsänen, S. 2018. Opetuksen sisältö on enimmäkseen jäänyt 1800-luvulle. Viitattu 14.12.2019 <https://yle.fi/aihe/artikkeli/2018/04/13/opetetaanko-koulussa-fysiikkaa-vaarin-syksy-rasanen-opetuksen-sisalto-on>
- Stefani, C. & Tsapalis, G. 2009. Students' levels of explanations, models, and misconceptions in basic quantum chemistry: A phenomenographic study. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(5), s. 520-536.
- Stevens, S.Y., Delgado, C. & Krajcik, J.S. 2010. Developing a hypothetical multi-dimensional learning progression for the nature of matter. *Journal of Research in Science Teaching*, 47(6), s. 687-715. DOI 10.1002/tea.20324.
- Thacker, B.A. 2003, Recent advances in classroom physics, *Reports on Progress in Physics*, 66(10), s. 1833-1864.
- Tsapalis, G. & Papaphotis, G. 2002. Quantum-chemical concepts: are they suitable for secondary students? *Chem. Educ. Res. Pract.*, 3(2), s. 129-144.
- Wiener, G. J., Woithe, J., Brown, A. & Jende, K. 2016. Introducing the LHC in the classroom: An overview of education resources available. *Physics Education*, 51(3)
- Wutiprom, S., Sharma, M.D., Johnston, I.D., Chitaree, R. & Soankwan, C. 2009, Development and Use of a Conceptual Survey in Introductory Quantum Physics, *International Journal of Science Education*, 31(5), s. 631-654.